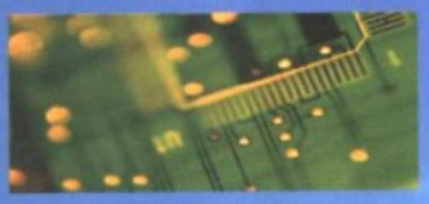
零开始学电子技术丛书

从零开始学电路基础

刘建清 主编
寻立波 刘汉文 李 雨 编著

随书附光盘一张

国防工业出版社
National Defense Industry Press



责任编辑：杨星豪　xhyang@ndip.cn
文字编辑：李　燕
责任校对：钱辉玲
封面设计：王晓军　xjwang@ndip.cn

从零开始学电子技术丛书

从零开始学电路仿真Multisim与电路设计Protel技术
从零开始学电气控制与PLC技术
从零开始学电子测量技术
从零开始学CPLD和Verilog HDL编程技术
从零开始学单片机C语言
从零开始学单片机技术
从零开始学电路基础
从零开始学电子元器件识别与检测技术
从零开始学电动机控制与维修技术
从零开始学模拟电子技术
从零开始学数字电子技术

◎ 上架建议：电子技术 ◎
http://www.ndip.cn
ISBN 7-118-04786-4
9 787118 047868 >

ISBN 7-118-04786-4/TN · 763
定价：32.00 元（含光盘）

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

TM13
162D
2007

从零开始学电子技术丛书

从零开始学电路基础

刘建清　主编
寻立波　刘汉文　李雨　编著

国防工业出版社
·北京·

内 容 简 介

电路基础是学习电子技术的起步知识。本书就是为使初学者从零开始，快速掌握电路基础知识而编写的。与传统的电路基础教材不同的是，本书摈弃了运用高等数学以及大量的公式计算和定量分析的讲法，注重定性和概念，注重基础知识与实践，并配合计算机仿真软件的仿真实验，使基础知识的学习做到不枯燥、不深奥。本书所介绍的电路基础知识包括：电路的基本定律、定理和基本分析方法，磁场与磁路，交流电路，互感与变压器，电路的过渡过程等内容。

本书附赠光盘一张，光盘中包含有最新电路仿真软件 Edison 的试用版，可供读者在学习电路基础知识时使用。

本书可供工矿企业的技术人员、技工、电气工人、家电维修人员以及无线电爱好者阅读，也可作为中专、中技的教材或教学参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

从零开始学电路基础/刘建清主编；寻立波，刘汉文，李雨编著. —北京：国防工业出版社，2007.1
(从零开始学电子技术丛书)
ISBN 7-118-04786-4

Ⅰ. 从... Ⅱ. ①刘...②寻...③刘...④李...
Ⅲ. 电路理论 Ⅳ. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 113544 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)
北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售
*
开本 787×1092 1/16 印张 18¼ 字数 415 千字
2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 32.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误，我社负责调换)

国防书店：(010)68428422 发行邮购：(010)68414474
发行传真：(010)68411535 发行业务：(010)68472764

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

丛书前言

我们所处的时代是一个知识爆炸的新时代。新产品、新技术层出不穷，电子技术的发展更是日新月异。可以毫不夸张地说，电子技术的应用无处不在，电子技术正在不断地改变着我们的生活，改变着我们的世界。

读者朋友：当你对妙趣横生的电子世界发生兴趣时；当你彷徨于就业的关口，想成为电子产业中的一名员工时；当你跃跃欲试，想成为一名工厂的技术革新能手时；当你面对“无所不能”的“单片机”，梦想成为一名自动化高手时；当你的头脑里冒出那么多的奇思妙想，急于把它们应用于或转化为产品时……都是那么急切地想补充自己有关电子技术方面的知识，这时，你首先想到的是找一套适合自己学习的电子技术图书阅读。《从零开始学电子技术丛书》正是为了满足广大读者特别是电子爱好者的实际需要和零起点入门的阅读要求而编著的。

和其他电子技术类图书相比，本丛书具有以下特点：

内容全面，体系完备。本丛书给出了广大电子爱好者学习电子技术的全方位解决方案，既有初学者必须掌握的电路基础、模拟电路和数字电路等基础理论，又有电子元器件检测、电子测量仪器的使用、电路仿真与设计等操作性较强的内容，还有电气控制与PLC、单片机、CPLD等综合应用方面的知识，因此，本丛书内容翔实，覆盖面广。

通俗易懂、重点突出。传统的电子技术图书和教材在介绍电路基础和模拟电子技术等内容时，大都借助高等数学这一工具进行分析，这就给电子爱好者自学电子技术设置了一道门槛，使大多数电子爱好者失去了学习的热情和兴趣。本丛书在编写时，完全考虑到了初学者的需要，不涉及高等数学方面的公式，尽可能地把复杂的理论通俗化和实用化，将烦琐的公式简易化，再辅以简明的分析及典型的实例，从而形成了本丛书通俗易懂的特点。为了满足不同层次读者的需求，本丛书对难点和扩展知识用“*”进行了标注，初学者可跳过此内容。

实例典型，实践性强。本丛书最大程度地强调了实践性，书中给出的例子大都经过了验证，可以实现，并且具有代表性；本丛书的大多数分册都配有光盘，光盘中收录了书中的实例、常用软件、实验程序和大量珍贵资料，以方便读者学习和使用。

内容新颖，风格活泼。本丛书所介绍的都是电子爱好者最为关心并且在业界获得普遍认同的内容，本丛书的每一分册都各有侧重，又互相补充，论述时疏密结合，重点突出。对于重点、难点和容易混淆的知识，书中还特别进行了标注和提示。

把握新知，结合实际。电子技术发展日新月异，为适应时代的发展，本丛书还对电子技术的新知识做了详细的介绍；本丛书中涉及的应用实例都是编著者开发经验的提炼和总结，相信一定会给读者带来很大的帮助。在讲述电路基础、模拟和数字电子技术时，还

专门安排了计算机辅助软件的仿真实验，实验过程非常接近实际操作的效果，使电子技术的学习变得更为直观，使学习变得更加生动有趣，这可以加深读者对电路理论知识的认识。

总之，对于需要学习电子技术的电子爱好者而言，选择《从零开始学电子技术丛书》不失为一个好的选择。本丛书一定能给你耳目一新的感觉，当你认真阅读之后将会发现，无论是你所读的书，还是读完书的你，都有所不同。

感谢本丛书的策划者——电子科普领域中的知名专家、中国电子学会高级会员刘午平先生，他与我们共同交流，共同探讨，达成了共识，确立了写作方向，并为本丛书的编排、修改和出版做了大量卓有成效的工作，他以丰富的专业知识和认真、敬业的态度为我们所敬佩；感谢山东持恒开关厂总经理陈培军先生和山东金曼克电气集团设计处总工程师高广海先生，他们对本丛书的编写提出了很多建设性的意见和建议，为本丛书的许多实验提供了强有力的支持与帮助，并参与了部分图书的编写工作；感谢网络，本丛书的许多新知识、新内容都是我们通过网络而获得的，我们在写作过程中遇到的许多疑难问题也大都通过网络得以顺利解决，对于这么多乐于助人、无私奉献的站主和作者们，无法在此一一列举，只能道一声“谢谢了！”感谢众多电子报刊、杂志的编辑和作者，他们为本丛书提供了许多有新意、有实用价值的参考文献，使得这套丛书能够别出心裁、与时俱进；感谢国防工业出版社，能与国内一流的出版社合作，我们感到万分的荣幸；感谢其他对本丛书的出版付出过辛勤工作的人士，没有他们的热心与支持，本丛书不知何时才能与读者见面！

最后，祝愿本丛书的每一位读者在学习电子技术的过程中，扬起风帆，乘风破浪！

丛书编者

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

前　言

本书是一本讲述电路基础理论的教材。但基础的教材并不是低级的教材，良好的基础是深入实际之本。对于实际工作来说，绝大多数时候需要的是基础的东西。

按照结构清晰，层次分明的原则，本书可分为以下几部分：

第一部分电路分析篇。主要包括本书的第1～4章，重点介绍了电路基础知识、电路的基本定律、电路的等效、电路的基本分析方法和重要定理等内容。

第二部分为磁场与磁路基础篇。主要包括本书的第5章，重点介绍了磁场和磁感线、安培力和磁感应强度、电磁感应、磁性材料的性能以及磁路的基本定律等内容。

第三部分为交流电路和三相交流电路分析篇。主要包括本书的第6章和第7章。重点介绍了正弦交流电的产生、三要素和表示方法，电阻、电感和电容交流电路，RC、LC交流电路，三相交流电的产生以及与负载的连接，供电与用电，安全用电与建筑防雷等内容。

第四部分为互感与变压器分析篇。主要包括本书的第8章。这部分内容主要讨论了互感现象和变压器的原理，并对常用变压器进行了介绍。

第五部分为电路的过渡过程分析篇。主要包括本书的第9章。主要分析RC、RL线性电路的过渡过程，使读者对线性电路的过渡过程具有初步的理论基础，着重讨论两个问题：一是过渡过程中电压和电流随时间而变化的规律；二是影响过渡过程快慢的时间常数。

在讲述本书内容时，还专门安排了Edison4.0电路仿真软件的仿真实验，实验过程非常接近实际操作的效果。仿真软件不但提供了各种丰富的分立元件和集成电路等元器件，还提供了各种丰富的调试测量工具：各种电压表、电流表、示波器、指示器、分析仪等。是一个全开放性的仿真实验平台，给我们提供了一个完备的综合性实验室，可以在任意组合的实验环境搭建实验。电子爱好者通过实验，将使学习变得生动有趣，加深对电路理论知识的认识。

本书附赠光盘一张，光盘中包含有最新电路仿真软件Edison的试用版，可供读者在学习电路基础时使用。感谢Edison软件中国总代理广州捷嘉高科技有限公司提供Edison软件试用版的授权。如果读者需要购买该系列软件的正式版，可以登录广州捷嘉高科技有限公司的网站www.gsltech.com.cn进行查询。

由于时间仓促，书中错漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作　者

目　　录

第一章　电路与电场基础知识 …… 1
第一节　电路及其基本物理量 …… 1
一、电路和电路图 …… 1
二、电路的基本物理量 …… 3
三、电路的三种状态 …… 10
第二节　电阻及电阻定律 …… 11
一、电阻的定义 …… 11
二、电阻定律 …… 11
三、可变电阻 …… 12
四、电阻的串联与并联 …… 12
第三节　导体、绝缘体、半导体和超导体 …… 13
一、导体和绝缘体 …… 13
二、半导体 …… 13
三、超导体 …… 13
第四节　电荷和电场 …… 14
一、电荷间的相互作用 …… 14
二、电场强度和电场线 …… 15
三、电场中的导体 …… 16
四、电势和电势差 …… 18
五、静电的防止和应用 …… 21
六、带电粒子在匀强电场中的运动 …… 21
第五节　电容器 …… 25
一、电容器的定义 …… 25
二、电容器的分类 …… 25
三、平行板电容器的电容 …… 26
四、电容器的特性 …… 26
★五、电容器的容抗 …… 29
★六、电容器的连接 …… 30
第二章　电路基本定律 …… 35
第一节　欧姆定律和焦耳定律 …… 35
一、部分电路欧姆定律 …… 35

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

二、焦耳定律 …… 36
三、闭合电路欧姆定律 …… 38
第二节 基尔霍夫电流和电压定律 …… 41
一、支路、结点、回路和网孔 …… 41
二、基尔霍夫电流定律 …… 41
三、基尔霍夫电压定律 …… 42
第三节 电路中电位的计算 …… 43
第三章 电路的等效变换 …… 45
第一节 电阻电路的等效变换 …… 45
一、根据等势点画等效电路图 …… 45
二、对称电路的等效电阻求法 …… 47
三、惠斯通电桥及其应用 …… 49
四、外加电源法求等效电阻 …… 50
★五、电阻△形联结和Y形联结等效变换 …… 51
★六、无穷网络电阻的求法 …… 53
第二节 电压源、电流源及其等效变换 …… 54
一、电压源 …… 54
二、电流源 …… 55
三、电压源与电流源的等效变换 …… 56
四、电源的串并联 …… 57
★第三节 受控源简介 …… 61
第四章 电路基本分析方法和重要定理 …… 63
第一节 电路基本分析方法 …… 63
一、支路电流法 …… 63
二、结点电压法 …… 65
第二节 电路分析重要定理 …… 67
一、叠加原理 …… 67
二、戴维南定理 …… 69
★三、诺顿定理 …… 73
★第三节 非线性电阻电路的分析 …… 75
第五章 磁场与磁路基础知识 …… 78
第一节 磁场和磁感线 …… 78
一、简单磁现象 …… 78
二、磁体周围的磁场和磁感线 …… 79
三、电流的磁场和磁感线 …… 79
四、地磁场 …… 83
五、磁场的应用 …… 84

第二节　安培力和磁感应强度 …… 85
一、安培力的大小和磁感应强度 …… 85
二、安培力的方向和左手定则 …… 86
三、安培力的应用 …… 89
四、磁场中的运动电荷 …… 92
第三节　电磁感应 …… 97
一、磁通量和电磁感应现象 …… 97
二、法拉第电磁感应定律 …… 101
三、楞次定律和右手定则——感应电流的方向 …… 103
四、电磁感应现象中能量的转化 …… 105
五、自感 …… 111
六、涡流 …… 117
第四节　磁性材料的性能 …… 118
一、磁导率 …… 118
二、磁场强度 …… 119
三、磁性材料的磁性能 …… 119
四、磁性材料的分类 …… 120
*第五节　磁路及其基本定律 …… 121
一、磁路的概念 …… 121
二、磁路基本定律 …… 121
第六章　交流电路 …… 123
第一节　正弦交流电的产生及变化规律 …… 123
一、直流电和交流电 …… 123
二、正弦交流电的产生 …… 124
三、正弦交流电的变化规律 …… 125
第二节　正弦交流电的三要素 …… 128
一、瞬时值、最大值、有效值和平均值 …… 128
二、周期、频率和角频率 …… 130
三、相位、初相位和相位差 …… 130
四、正弦波形的绘制 …… 132
第三节　正弦交流电的表示法 …… 133
一、函数法 …… 133
二、图像法 …… 134
三、相量图表示法 …… 134
第四节　电阻、电感和电容交流电路 …… 137
一、纯电阻电路 …… 137
二、纯电感电路 …… 138

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

三、纯电容电路 …… 142
四、RLC 串联交流电路 …… 145
第五节 功率因数的提高 …… 151
一、功率因数降低的原因 …… 151
二、提高功率因数的措施 …… 152
第六节 RC 和 LC 电路 …… 153
一、RC 串联和并联电路 …… 154
二、滤波器 …… 155
三、LC 自由振荡电路 …… 156
四、LC 谐振电路 …… 159
五、陷波器 …… 162
六、RC 移相电路 …… 164
第七节 叠加法在交流电路中的应用 …… 168
★第八节 复数在交流电路中的应用 …… 170
一、复数 …… 170
二、正弦量的复数表示法 …… 171
三、复数的应用 …… 173
第七章 三相交流电路与安全用电 …… 176
第一节 三相交流电源 …… 176
一、三相交流电的产生 …… 176
二、三相电源的连接方式 …… 177
第二节 三相电路负载的连接 …… 178
一、负载星形连接的三相电路 …… 179
二、负载三角形连接的三相电路 …… 182
第三节 三相电路的功率 …… 183
一、有功功率 …… 183
二、无功功率和视在功率 …… 183
第四节 供电与用电 …… 184
一、电力系统组成 …… 184
二、能源的利用 …… 185
三、电能的输送 …… 186
四、电气照明 …… 190
第五节 安全用电与建筑防雷 …… 192
一、什么是触电 …… 193
二、触电的危险 …… 193
三、人体触电的几种形式 …… 196
四、保护接地与保护接零 …… 197

五、触电事故的规律和预防 …… 200
六、建筑防雷 …… 202
第八章　互感和变压器 …… 204
第一节　互感 …… 204
一、互感现象 …… 204
二、互感系数 …… 204
三、互感电动势 …… 205
四、互感线圈的同名端及其判断方法 …… 205
五、互感线圈的连接 …… 207
第二节　变压器 …… 210
一、变压器的结构 …… 210
二、变压器的原理 …… 211
三、变压器的功率和效率 …… 216
四、变压器的额定值 …… 218
五、特殊变压器 …… 219
六、变压器的同名端特性说明 …… 222
七、电源变压器的设计 …… 222
八、变压器的屏蔽 …… 227
第九章　电路的过渡过程 …… 228
第一节　电路的过渡过程 …… 228
一、电路的过渡过程 …… 228
二、电路过渡过程产生的原因 …… 228
三、研究电路过渡过程的意义 …… 229
第二节　换路定则 …… 229
一、换路定则的概念 …… 229
二、电路初始值的计算 …… 230
三、电路稳态值的计算 …… 232
第三节　RC 电路充放电的过渡过程 …… 233
一、RC 电路放电的过渡过程 …… 233
二、RC 电路充电的过渡过程 …… 235
第四节　微分电路和积分电路 …… 238
一、微分电路 …… 238
二、积分电路 …… 239
第五节　RL 电路的过渡过程 …… 239
一、与恒定电压接通 …… 239
二、短路与断开 …… 239
第十章　Edison 仿真软件及其在电路基础实验中的应用 …… 241

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第一节　Edison 仿真软件的基本使用方法 …… 241
一、Edison 简介 …… 241
二、Edison4.0 的立体声光实验室 …… 242
三、电路图分析器 …… 254
四、Edison4.0 的控制面板 …… 255
五、Edison4.0 的基本操作 …… 256
六、电路图编辑器 …… 258
第二节　用 Edison 仿真软件做电路基础实验 …… 264
一、闭合电路欧姆定律实验 …… 264
二、电灯泡实验 …… 265
三、分压实验 …… 266
四、移相和耦合电路实验 …… 267
五、串联谐振电路实验 …… 269
六、电路的过渡状态实验 …… 271
七、RC 电路充放电实验 …… 272
八、用 Edison4.0 电路编辑器进行电路基础实验 …… 274
参考文献 …… 280

第一章　电路与电场基础知识

本章首先介绍了电路及电路图、串联电路和并联电路，阐明了电路的基本物理量，讲述了电阻及电阻定律，并对导体、绝缘体、半导体和超导体进行了简要介绍；最后对电荷、电场和电容器作了简要分析。

第一节　电路及其基本物理量

一、电路和电路图

1. 电路

电路就是电的流通路径，通常由电源、负载、连接导线和控制器组成。其中，电源是将非电能转换为电能的设备，如电池、发电机等。负载是将电能转换为非电能的设备，如电灯、电炉、电动机等。连接导线用以传输及分配电能，控制器用来控制电路通断、保护电源，如开关、熔断丝、继电器等。图 1-1 是一个最简单的电路，也就是我们日常生活中经常用到的手电筒简单电路。

2. 电路图

在实际工作中，为便于分析，通常将电路中的实际元件用图形符号表示在电路中，称为电路原理图，也叫电路图。图 1-2 是图 1-1 的电路图。

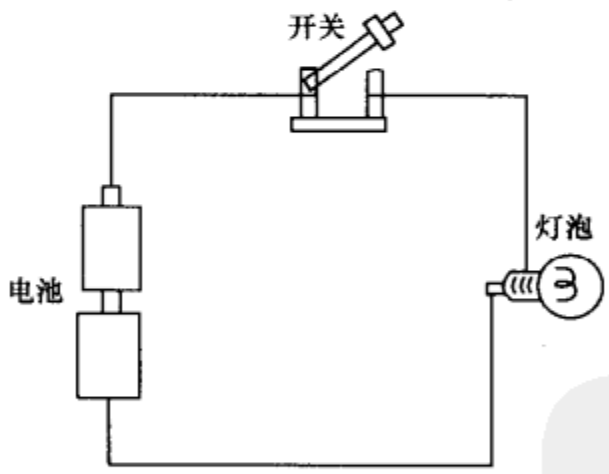


图 1-1　简单电路

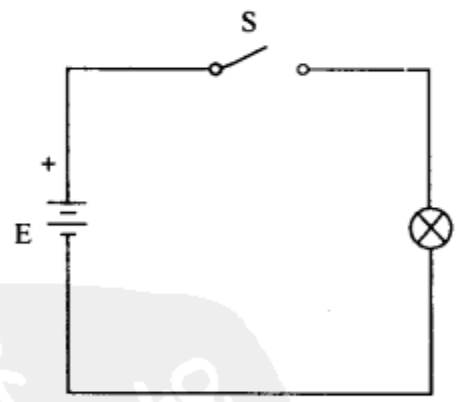


图 1-2　简单电路的电路图

图 1-3 是电路图中几种常用元件符号。

3. 串联电路和并联电路

按照图 1-4，把两只小灯泡，顺次连接在电路里，一只灯泡亮时另一只也亮。像这样把元件逐个顺次连接起来，就组成了串联电路。

如果要求两只灯泡可以各自开和关，互不影响，可以按照图 1-5，把两只灯泡并列地接在电路中，并各自安装一个开关。像这样把元件并列地连接起来，就组成了并联电路。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

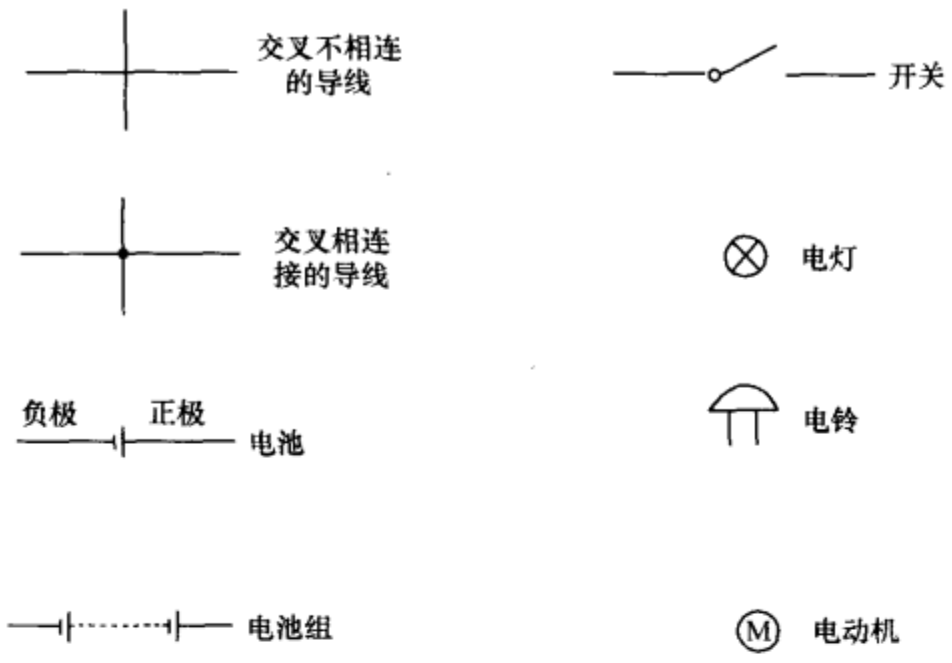


图 1-3　电路元件符号

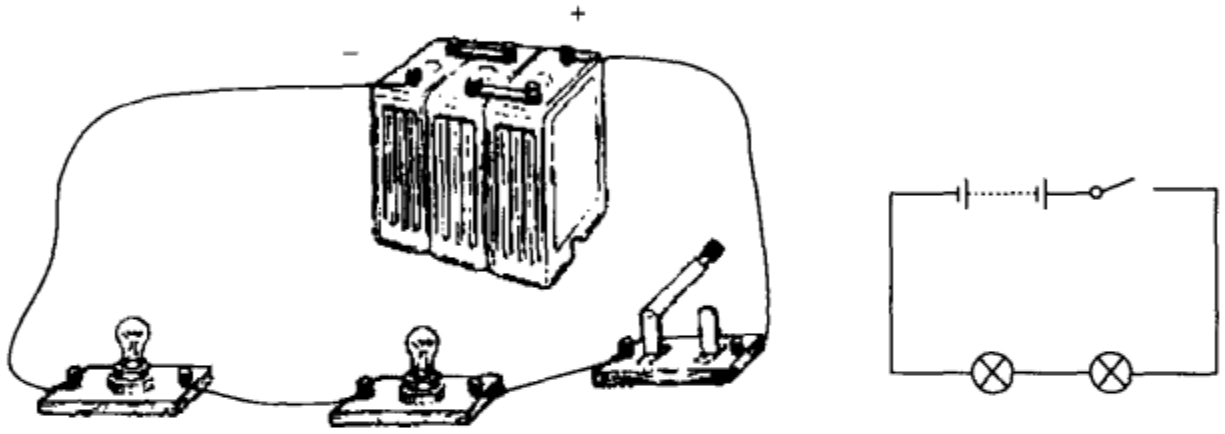


图 1-4　串联电路

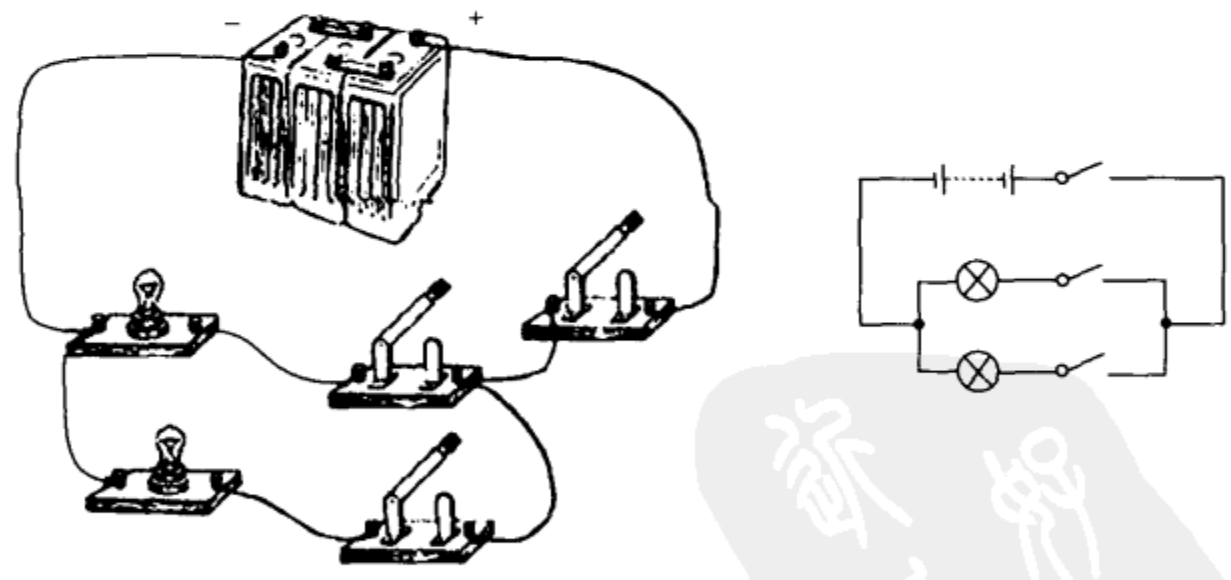


图 1-5　并联电路

串联电路和并联电路是最基本的电路，它们的实际应用非常普遍。市场上出售的一种装饰用小彩灯，经常被用来装饰店堂、居室，烘托欢乐的气氛，其中的几十只彩色小灯泡就是串联的。在家庭中，像电灯、电风扇、电冰箱、电视机等家用电器，都是并联在电路中的，如图 1-6 所示。

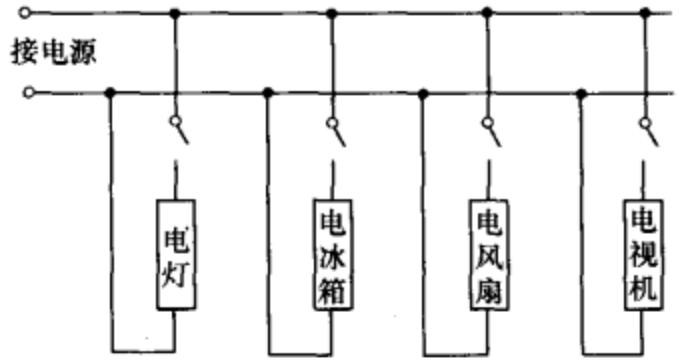


图 1-6　家用电器的并联连接

有了串联电路和并联电路的知识，就可以根据实际需要来连接电路了。如果要使几个电器总是同时工作（只要有一个开路，其他的就停止工作），可以把它们串联在电路中；如果要求几个家用电器可以分别控制，就应该让它们并联在电路中，并且分别装上开关。

二、电路的基本物理量

1. 电流

（1）电流的定义

水管中的水流有大有小，在相同的时间内，从水管中流出的水越多，水流就越大。导体中的电流也有大小，但是电流看不见，摸不着，怎样才能知道它的大小呢？

人们发现，电流通过导体时会产生各种效应。因此可以根据产生效应的大小来判断电流的大小。电流通过灯泡时，灯丝变热而发光，这是电流的热效应。电流还可以发生磁效应，这将在以后相关章节中学习。下面做一实验，来判断电流的大小。

实验时，把一只小灯泡用导线跟一节干电池连通，再把这只小灯泡跟两节干电池连通，注意观察这两种情况下灯泡的发光亮度。

从实验可以看出，用一节干电池时，小灯泡发光较暗；用两节干电池时，小灯泡发光较亮。对同一小灯泡，它越亮就表示通过它的电流产生的效应越大，也就是电流越大。电流是由电荷的移动形成的，在一定时间内，通过导体某一横截面的电荷越多即电量越多，电流就越大。

电流的大小用电流强度（简称电流）表示，电流强度等于 1s 内通过导体横截面的电量。国际上通常用字母 I 表示电流，如果用 q 表示通过导体横截面的电量，t 表示通电时间，那么

$$I=\frac{q}{t}$$

如果上式中 q 的单位用库，符号是 C；时间 t 的单位用秒，符号是 s；电流 I 的单位就是安培，简称安，符号是 A。如果在 1s 内通过导体横截面的电量是 1 库，导体中的电流就是 1 安。

1 安＝1 库/1 秒

如果 10s 内通过导体横截面的电量是 20C，那么导体中的电流

$I=q/t=20$ 库/10 秒＝2 安，用符号表示为：$I=20\text{C}/10\text{s}=2\text{A}$

常用的电流单位还有毫安（mA）和微安（μA）。电流单位的换算关系如下：1A＝1000mA，1mA＝1000μA。

（2）电流的方向

电流不但有大小，而且还有方向，习惯规定正电荷运动的方向或负电荷（自由电子）运

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

动的反方向为电流的实际方向。电路中电流数值的正与负与参考方向密切相关。

参考方向是计算复杂电路时任意假定的电流或电压的方向，并不一定是它们的实际方向。所以，参考方向仅仅是计算电流或电压值和确定其实际方向的依据。

引入参考方向这个概念的目的在于，可以用代数量说明电流的大小和方向，代数量的绝对值表示电流的大小，正值和负值可以判定它们的实际方向。

引入参考方向后，解决了电路中电流值的计算及实际方向的确定问题。那么参考方向怎样设置，代数量怎样表示电流的大小和方向呢？

参考方向是任意假定的电流的方向。如图 1-7(a)、(b)所示，电流的方向，不是 a 到 b，就是 b 到 a，可以任意选定一个方向。

若电流的计算值为正，表示实际方向与参考方向相同，见图 1-7(a)。

若电流(或电压)的计算值为负，表示实际方向与参考方向相反，见图 1-7(b)。

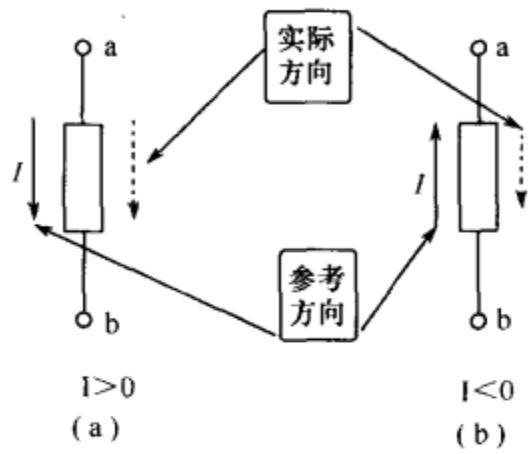


图 1-7　电流的方向

需要说明的是：电流的实际方向是客观存在的，与参考方向的设置无关。参考方向假定的电流的方向，是计算的唯一依据，一经选定，在电路计算中就要以此为标准，不能随意变动。在不注明参考方向时，电流的正负值均无意义。对同一电流，若参考方向选择不同，计算结果应差一个负号。

(3)电流的分类

电流可分为直流电流和交流电流两大类。

直流电流是大小和方向不随时间变化的恒定电流。如图 1-8 所示。

变动电流是大小和方向均随时间变化的电流，常见的交流电流主要有正弦交流电流(如图 1-9 所示)和锯齿波电流(如图 1-10 所示)等，交流电流一般用小写字母 i 表示。

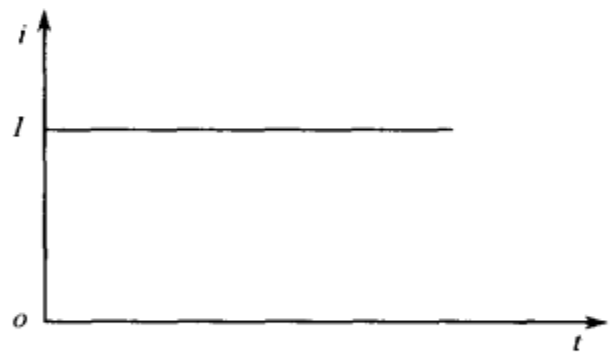


图 1-8　直流电流

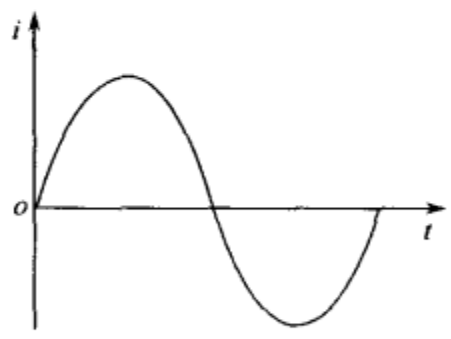


图 1-9　正弦交流电流

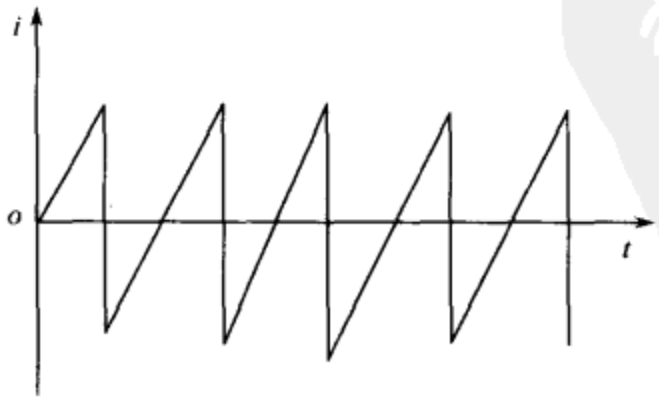


图 1-10　锯齿波电流

为便于理解和记忆，现将电流小结如下（见表 1-1）。

表 1-1　电流小结

定义	符号、数学表达式	单位名称（符号）及换算关系	实际方向
电荷有规则的运动形成电流。其大小等于穿过某导体横截面的电荷量与所需时间之比，这个比值称为电流强度，简称电流	大小和方向均不随时间改变的电流称为恒定电流或直流电流，简称直流（DC），用符号 I 表示： $I=q/t$ 大小、方向随时间变化的电流称为变动电流，用符号 i 表示 $i=\mathrm{d}q/\mathrm{d}t$ 在一个周期内平均值为零的变动电流称为交变电流，简称交流（AC），也用符号 i 表示	千安（kA）、安（A）、毫安（mA）、微安（μA）、纳安（nA） $1\mathrm{kA}=10^{3}\mathrm{A}$ $1\mathrm{mA}=10^{-3}\mathrm{A}$ $1\mu\mathrm{A}=10^{-6}\mathrm{A}$ $1\mathrm{nA}=10^{-9}\mathrm{A}$ 1A＝1 库仑（C）/1 秒（s）	习惯规定正电荷运动的方向或负电荷（自由电子）运动的反方向

2. 电压

（1）电压的定义

为了衡量电场力做功的大小，引入了电压这个物理量。从电场力做功概念定义，电压就是将单位正电荷从电路中一点移至电路中另一点电场力做功的大小。如图 1-11 所示。

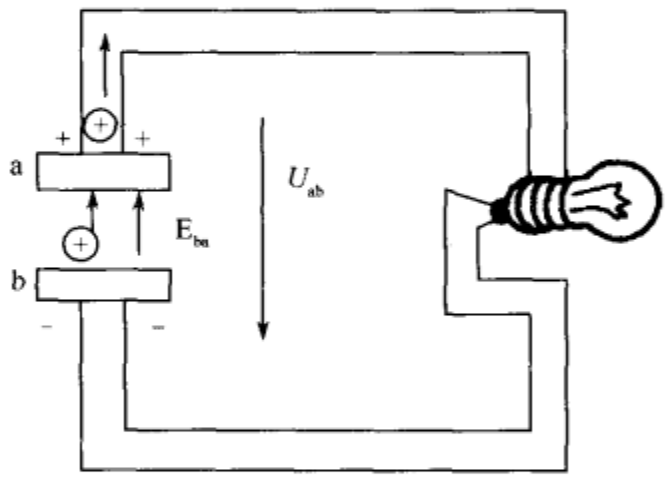


图 1-11　电压定义示意图

电压类似于我们生活中常说的水压。其定义为：a、b 两点间的电压 U_{ab} 在数值上等于把单位正电荷从 a 点移到 b 点时，电场力所做的功，用公式表示为：

$$U_{ab}=\frac{W}{q}$$

电压的单位是伏特，简称伏，符号是 V，一节干电池的电压 $U=1.5\mathrm{V}$，家庭电路的电压 $U=220\mathrm{V}$。比伏大的单位有千伏（kV），比伏小的单位有毫伏（mV）、微伏（μV）等。它们的换算关系如下：$1\mathrm{kV}=1000\mathrm{V}$，$1\mathrm{V}=1000\mathrm{mV}$，$1\mathrm{mV}=1000\mu\mathrm{V}$。

（2）电压的方向

电压不但有大小，而且还有方向，电压的实际方向规定由实际高电位指向实际低电位。在不知道电压实际方向时，可以先假定一个参考方向。

参考方向是任意假定的电压的方向。如图 1-12（a）、（b）所示，电压的方向不是 a 到 b，就是 b 到 a，可以任意选定一个方向。

若电压的计算值为正，表示实际方向与参考方向相同，见图 1-12（a）。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

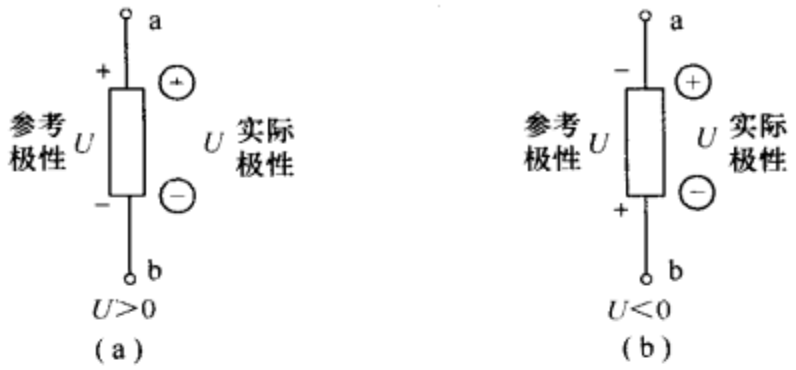


图 1-12　电压方向

若电压的计算值为负，表示实际方向与参考方向相反，见图 1-12(b)。

在电路图中，一般用“+”“−”号标出电压的参考方向。“+”号为高电位，“−”号为低电位，由高电位指向低电位的方向是电压的参考方向。文字叙述时，多用字母加双下标表示参考方向。例如，在图 1-12 所示的电路中，电压的参考方向由 a 到 b，可用 U_{ab} 表示。

(3)电压的分类

电压可分为直流电压和变动电压两大类。

直流电压是指大小和方向均不随时间变化的电压，也称为恒定电压，一般用大写符号 U 表示。如图 1-13 所示。

大小和方向均随时间变化的电压，称为变动电压，如图 1-14 所示的方波电压即为变动电压。

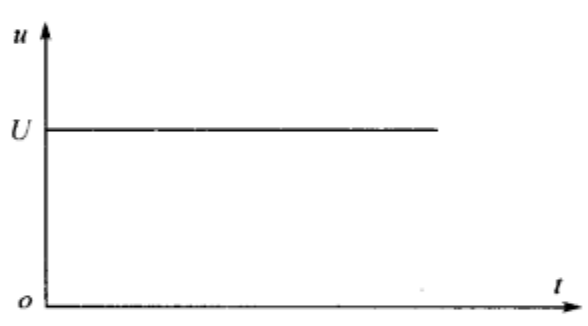


图 1-13　直流电压

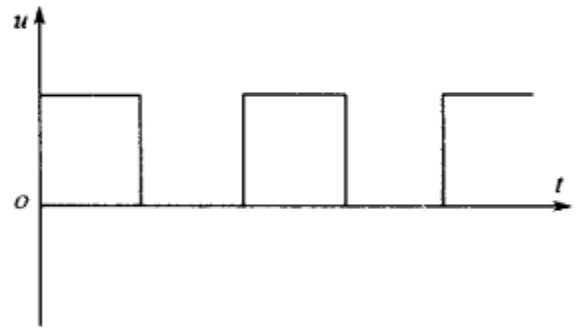


图 1-14　方波电压

周期性变化且平均值为零的变动电压称为交流电压，常见正弦交流电压如图 1-15 所示。

为便于理解和记忆，现将电压小结如下(见表 1-2)。

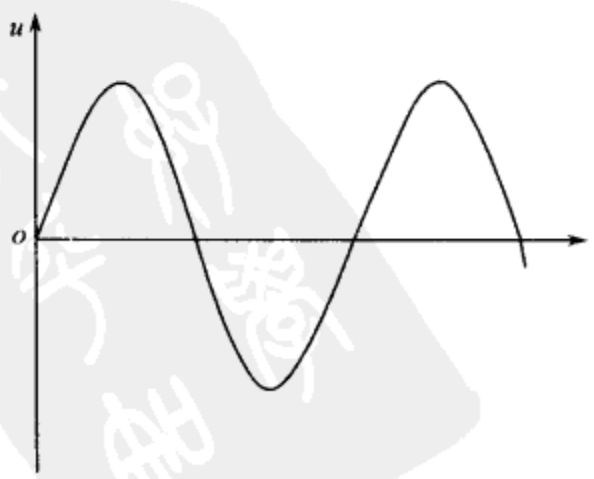


图 1-15　正弦交流电压

表 1-2　电压小结

定义	符号、数学表达式	单位名称(符号)及换算关系	实际方向
电路中 a、b 两点间的电压等于单位正电荷在电场力作用下，由 a 点移到 b 点电能的变化量与电荷量之比。 电压是衡量电场力做功能力的物理量	大小和方向均不随时间变化的电压称为恒定电压或直流电压，用符号 U 表示： $U_{ab}=\frac{W}{q}$ 大小和方向均随时间变化的电压称为变动电压，用符号 u 表示： $u_{ab}=\frac{dW}{dq}$ 周期性变化且平均值为零的电压称为交流电压，也用符号 u 表示	千伏(kV)、伏特(V)、毫伏(mV)、微伏(μV) $1kV=10^{3}V$ $1mV=10^{-3}V$ $1\mu V=10^{-6}V$ 1V=1 焦耳(J)/1 库仑(C)	从高电位指向低电位。即电位下降的方向

3. 电位

在电路分析中，经常用到“电位”这个物理量，那么“电位”是什么呢？在电路中任选一参考点，计算或测量其他各点对参考点的电压降，所得的结果就是该点的电位。

对于“电位”，需要说明以下几点：

①电位是相对物理量，如果不确定参考点，讨论电位的高低无意义。

②在同一电路中，参考点不同时，各点电位值不同。

③在同一电路中，参考点确定后，电路中各点电位有唯一确定数值(电位单值性原理)。

④常选大地或设备机壳作为参考点。

⑤电位的单位与电压单位相同。

为便于理解和记忆，现将电位小结如下(见表 1-3)。

表 1-3　电位小结

定　义	电位与电压关系	正负值意义
在电路中任选一点“O”为参考点，则由某点 a 到参考点“O”之间的电压 u_{aO} 称为 a 点的电位，记为 U_a。 参考电位点可任意选择，若选 O 点为参考点，则 $U_O=0V$，即参考点的电位等于 0	两点之间的电压等于两点电位之差 $U_{ab}=U_a-U_b$。 电位的单位同电压	正值：表示该点电位高于参考点。正值越大，电位越高。 负值：表示该点电位低于参考点。负值越大，电位越低

4. 电动势

电源是把其他形式的能量转化成电势能的一种装置，它能克服静电力做功，迫使正电荷从低电势处经电源内部移向高电势处，电源的作用就好像水泵的作用，使水由水位低处经水泵移动到水位高处。

每一电源都有正、负两极(电势高的为正极)。通常把电源内部正、负两极之间的电路称为内电路。正电荷由正极流出，经过外电路流入负极，然后，正电荷再靠非静电力从负

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

极经内电路流到正极，内、外电路构成闭合电路。在电源作用下，电荷在闭合电路中往复循环流动，形成恒稳电流。

实验证明，在结构一定的电源内部，当恒稳电流通过时，其他形式的能量转变为电能的量正比于所迁移的电量；不同的电源，当一定量的电荷从电源内部通过时，其他形式的能转变为电能的多少是不同的。这表明，在不同的电源内部，非静电力移送单位电量所做的功是不同的。为了表明电源非静电力做功本领的大小，以便比较各种不同的电源，引入了电源电动势这个概念。

电源电动势是电源中非静电力做功能力大小的标志，它在数值上等于电源内部非静电力移送单位正电荷从负极到正极所做的功。电源电动势的大小只取决于电源本身的结构和所处状态，而与外电路无关。从电动势定义知，它的单位与电压单位相同，也是焦耳/库仑(伏特)。电动势是电源特有的物理量，其值始终是正的。为便于应用，常给电动势规定一个方向：从电源的负极指向正极。

为便于理解和记忆，现将电动势小结如下(见表 1-4)。

表 1-4　电动势小结

定　义	符号、数学表达式	单位名称(符号)及换算关系	实际方向
电动势是衡量电源力做功能力的物理量，它在数值上等于电源中的局外力将单位正电荷从电源负极 b 点移到电源正极 a 点所做的功与电荷量之比	根据定义，电源正极 a 与负极 b 之间的电动势为 直流：$E_{ab}=-\frac{W}{q}$ 交流：$e_{ab}=-\frac{dW}{dq}$ 上式交直流的定义同电压	同电压	电源内部由低电位指向高电位，即电位升高的方向。 与电源端电压的方向相反

5. 电功

水流可以做功，例如水流可以推动水轮机做功；同样，电流也可以做功，例如，电风扇通电后，风扇电机转动起来，说明在电流通过电动机做功的过程中，电能转化为机械能。电流不仅通过电动机时做功，通过电灯、电炉等电器时都要做功，电流通过电炉时发热，电能转化为热能；电流通过电灯时，灯丝灼热发光，电能转化为光能。

电流做功的过程，实际就是电能转化为其他形式能量的过程。电流做了多少功，就有多少电能转化为其他形式的能量。

研究表明：电流所做的功跟电压、电流和通电时间成正比。电流所做的功叫做电功，如果电压 U 的单位用伏特，电流 I 的单位用安培，时间 t 的单位用秒，电功 W 的单位用焦耳，那么计算电功的公式是：

$$W=UIt\text{(适用条件：}I\text{、}U\text{ 不随时间变化)}$$

这就是说，电流在某段电路上所做的功，等于这段电路两端的电压、电路中的电流和通过时间的乘积。

通过手电筒灯泡的电流，每秒做的功大约是 1 焦耳，通过普通电灯的电流，每秒钟做的功一般是几十焦耳，通过洗衣机中电动机的电流，每秒钟做的功是 200 焦耳左右。

由于焦耳单位很小，用起来不方便，生活中常用“度”作为电功的单位。“度”又叫做“千瓦时”，符号是“kW·h”。是指用电设备功率为 1kW，运转 1h 所耗用的电能，即为

1kW·h 或 1 度电的用电量。比如，一只 25W 的电灯用 1h，其耗电为 0.025 度，使用 40h 才耗电 1kW·h 或 1 度电。同样，对发电设备来说，其发电量也用 kW·h 来表示，即指发电设备功率为 1kW，运转 1h 所发出的电能称为 1kW·h 或 1 度电的发电量。度和焦耳的换算关系如下：

$$1\text{ 度}=3.6\times10^{6}\text{焦，即 }1\text{kW}\cdot\text{h}=3.6\times10^{6}\text{J}$$

电功通常用电能表（俗称电度表，如图 1-16 所示）来测定。把电能表接在电路中，电能表的计数上前后两次读数之差，就是这段时间内用电的度数。例如，家中电能表在月初的读数是 180.4 度，月底的读数是 202.6 度，这个月家中用电就是 22.2 度。



图 1-16　电度表

目前，国内电力主要由火电、水电、核电等发电厂提供，其中火电约占 81%，水电约占 17%，核电仅占 1%。电力的每 1 度发电量，必须经过输电、变电、配电的复杂过程才能转变为我们常用的每 1 度用电量。

大型的火力发电厂、水力发电厂及核电站发出的电力，要供应范围很大的地区，要把电输送到几百千米甚至上千千米之外，就必须有一整套输电设施。电的输送需要克服导线的阻力，就如同水在管子中流动要克服管壁的阻力一样，要消耗一部分能量，为了减少输电损失，当输送相同功率时，可采用提高电压减少电流的办法，即用升压变压器把电压升高几十倍同时相应减小电流几十倍，就是常说的高压（11 万伏～50 万伏）输电，可大大减少输电的损失，而到用户处用电前经过变压器把电压降低。也就是说，发电厂发电机发出的电，经过升压站升高电压，由高压输电线向外输出，通过某高压中心变电所再进行降压到地区配电所，再由地区配电所分配给各个用户。因此，民用电用户不是直接从某一个电厂得到电的，而是经过电力网，转为配电的电力网络，统一管理、调度分配方使用户得到电。由于我国电力还不充裕，因此，节约用电不仅是节省个人开支，更是支援国家建设。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

6. 电功率

(1)电功率的定义

在相同的时间内,电流通过不同用电器所做的功一般并不相同。例如,在相同的时间内,电流通过电力机车的电动机所做的功,要显著大于通过电扇的电动机所做的功,为了表示电流做功的快慢,引入了电功率的概念。

电流在单位时间内所做的功叫做电功率。电功率用 P 来表示,$P=W/t$,而 $W=UIt$ 所以 $P=UI$。

上式表明,电功率等于电压与电流的乘积。

在上式中,若电压 U 的单位为伏,电流 I 的单位为安,则电功率 P 的单位为瓦特(简称瓦),符号是 W。电功率的单位还有千瓦,1kW=1000W。

(2)额定值

为使电气设备安全、经济地运行和保证一定的使用期限,生产部门要对产品的电压、电流、功率等值的使用范围进行一定的限制,额定值就是制造厂对产品使用参数的规定。

额定值通常标注在设备的铭牌上(机壳上的一块小金属牌),所以额定值又叫铭牌数据。额定值一般用带下标 N 的符号表示:额定电压为 U_N、额定电流为 I_N、额定功率为 P_N。

如灯泡上标着"pZZ220-100",表示额定电压是 220V,额定功率是 100W。使用时应将其接在 220V 电源上,此时灯泡消耗的功率是 100W。若将其接在 110V 电源上,灯泡就很暗;若接在 380V 电源上,灯泡就会强烈发光,甚至造成损坏。一般情况下应按铭牌数据的规定范围使用电器。

同样,在电烙铁上看到的铭牌数据"36V100W"或"220V60W",也是指的额定电压和额定功率。

三、电路的三种状态

电路在使用时,可能出现下列三种状态:

一是通路,也称闭路。是指电路中的开关闭合后构成的闭合回路,电路中有电流流过。在通常情况下,电源产生的功率等于负载消耗的功率与电源内部消耗的功率之和,符合能量守恒定律。

二是断路,也称开路。是指开关或电路中某处断开,电路中无电流流过,此时,电源输出的电压为开路电压,其值等于电源的电动势,输出功率等于零,即电源不输出功率,此时称电源处于空载状态。

三是短路,也称捷路。是指电路中的某两点直接连通,使电流走捷径。短路分为电源短路和元件短路两种情况,其中电源短路是危险的事故情况,又称事故短路。由于短路电流很大,超过了电源、连接导线的额定电流值,因而会引起电源或导线绝缘的损坏。为了迅速排除这种事故,通常在电源开关后面安装有熔断器(FU)。一旦发生短路,大电流即刻将熔断器烧断,故障电路自动切断,使电源、导线得到保护。在电工、电子技术中,有时为了某种需要,将一部分电路或某元件两端用导线相连。为了区分事故短路,把这种人为的连接称为短接。

第二节　电阻及电阻定律

一、电阻的定义

电阻是一个为电流提供通路的电子器件，可以定义为每单位电流在导体上所引起的电压。

电阻(R)＝电压(U)/电流(I)，即 $R=U/I$

电阻没有极性(正、负极)，这与电源不同，因此在电路中可以任意连接。

电阻元件的基本特征是消耗能量，其基本参量是电阻值，用字母 R 表示，单位是欧姆，简称欧，符号是 Ω。如果电阻两端的电压是 1 伏，通过的电流是 1 安，这段导体的电阻就是 1 欧，比较大的单位有千欧(kΩ)和兆欧(MΩ)，它们的换算关系如下：1kΩ＝1000Ω，1MΩ＝ 1000kΩ。

电阻的电路符号为



手电筒的小灯泡，灯丝的电阻为几欧到十几欧；日常用的白炽灯，灯丝的电阻为几百欧到千欧，实验室用的约 1m 长的铜导线，电阻小于百分之几欧，通常可以略去不计。

二、电阻定律

导体的电阻是由它本身的性质决定的，金属导体的电阻由它本身的长度 L、横截面积 S、所用材料和温度决定。在温度一定时，金属导体的电阻与它的长度 L 成正比，与它的横截面积 S 成反比，用公式表示为：

$$R=\rho\frac{l}{S}$$

这就是电阻定律，式中的比例常量 ρ 跟导体的材料有关，是一个反映材料导电性能的物理量，称为材料的电阻率。横截面积和长度相同的不同材料的导体，ρ 值越大，电阻越大。当 $L=1\text{m}$，$S=1\text{m}^2$ 时，ρ 的数值等于 R 值。可见，材料的电阻率在数值上等于这种材料制成的长为 1m、横截面积为 1m^2 的导体的电阻。式中 R 的单位是 Ω，L 的单位是 m，S 的单位是 m^2，所以 ρ 的单位是 Ω·m(欧姆米，简称欧米)。

几种导体材料在 20℃时的电阻率见表 1-5。

表 1-5　几种导体材料在 20℃时的电阻率

材料	电阻率/ρ/Ω·m	材料	电阻率/ρ/Ω·m
银	1.6×10^{-8}	铁	1.0×10^{-7}
铜	1.7×10^{-8}	锰铜合金	4.4×10^{-7}
铝	2.9×10^{-8}	镍铜合金	5.0×10^{-7}
钨	5.3×10^{-8}	镍铬合金	1.0×10^{-6}

从表 1-5 可以看出，纯金属的电阻率小，合金的电阻率大。连接电路用的导线一般用电阻率小的铝或铜来制作，电炉、电阻器的电阻丝一般用电阻率大的合金来制作。

各种材料的电阻率都随温度而变化，金属的电阻率随温度的升高而增大，电阻温度计就是利用金属的电阻随温度变化而制成的。常用的电阻温度计是利用金属铂做的，已知铂丝的电阻随温度的变化情况，测出铂丝的电阻就可以知道温度。有些合金如锰铜合金

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

和镍铜合金的电阻率几乎不受温度变化的影响，常用来制作标准电阻。

电阻定律揭示了导体电阻的大小与导体的长度、截面积、材料间的关系，它指出了导体的电阻由导体自身的因素所决定，也提出了一种控制、制造电阻的方法。常用的滑动变阻器就是依靠改变导线的长度达到改变阻值的目的。电阻定律仅适用于温度一定、粗细均匀的金属导体或浓度均匀的电解液。

需要说明的是：导体的电阻由公式 $R=U/I$ 定义，也可以利用其测量，但并不是由 U 和 I 决定的，而是由电阻定律决定的，即导体本身的性质决定的。

三、可变电阻

除了阻值固定不变的电阻以外，还有一种类型的电阻，其阻值可以改变，称为可变电阻或电位器。

电位器是一种可调电阻，对外有三个引出端，其中两个为固定端，一个为滑动端，也称中心轴头。两个固定端之间的电阻值最大，可以通过改变滑动端在电阻体上的位置改变固定端和滑动端之间的电阻值。

电位器在电路中的连接方式主要有两种。

一种是限流方式连接，如图 1-17 所示。移动滑片 P 可以改变连入电路中的电阻值，从而可以控制负载 R 中的电流。使用前，滑片 P 应置于变阻器阻值最大的位置。

另一种是分压方式连接，如图 1-18 所示。移动滑片 P 可以改变加在负载 R 上的电压，使用前，滑片 P 应置于负载 R 的电压最小的位置。

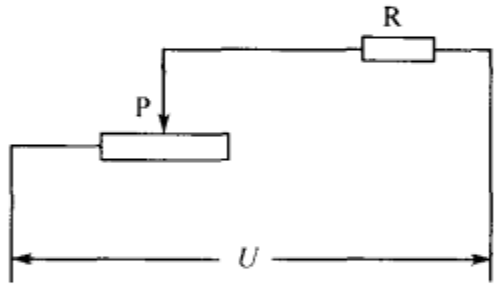


图 1-17　限流方式连接

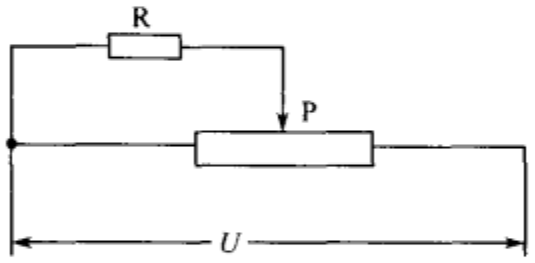


图 1-18　分压方式连接

四、电阻的串联与并联

1. 电阻串联

串联电路的总电阻等于各个电阻之和，以图 1-19 所示的 3 个串联电阻为例，则 $R=R_1+R_2+R_3$。

2. 电阻并联

并联电路总电阻的倒数等于各个电阻倒数之和，以图 1-20 所示的 3 个并联电阻为例，则 $\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}$。

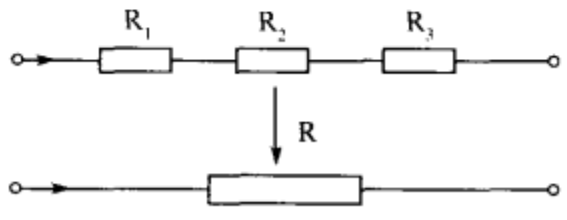


图 1-19　串联电阻

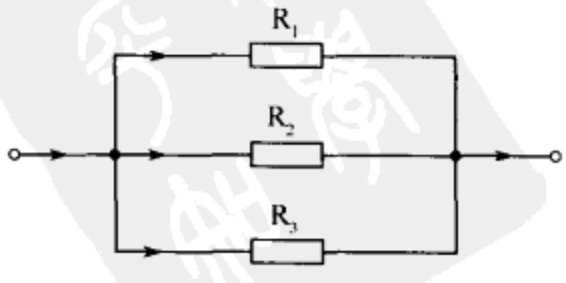


图 1-20　并联电阻

第三节　导体、绝缘体、半导体和超导体

一、导体和绝缘体

有的物体容易导电，有的物体不容易导电。容易导电的物体叫做导体，金属、石墨、人体、大地以及酸、碱、盐的水溶液等都是导体。相应地，不容易导电的物体叫做绝缘体，橡胶、玻璃、陶瓷、塑料、油等都是绝缘体。电线的芯线是用金属做的，因为金属是导体，容易导电，所以电线芯线外面包上一层橡胶或塑料，因为它们是绝缘体，能够防止漏电。

导体和绝缘体之间并没有绝对的界限。一般情况下，不容易导电的物体在条件改变时也可能导电。例如，玻璃是相当好的绝缘体，但如果给玻璃加热，使它达到红炽状态，它就变成导体了。

二、半导体

导体和绝缘体之间没有绝对的界限，绝缘体并非绝对不导电，只是绝缘体的电阻率很大。在室温下，金属导体的电阻率一般为 $10^{-8}\Omega\cdot m\sim10^{-6}\Omega\cdot m$，绝缘体的电阻率一般为 $10^{8}\Omega\cdot m\sim10^{18}\Omega\cdot m$。长为 1m、横截面积为 $1\times10^{-4}m^2$ 的一段绝缘体，两端加以 1V 电压，通过的电流为 $10^{-14}A\sim10^{-4}A$。可见电流是多么微小了。

有些材料，它们的导电性能介于导体和绝缘体之间，而且电阻不随温度的增加而增加，反随温度的增加而减小，这种材料称为半导体，半导体的电阻率为 $10^{-5}\Omega\cdot m\sim10^{6}\Omega\cdot m$。锗、硅、砷化镓、锑化铟等都是半导体材料。半导体的导电性能可以由外界条件所控制，如改变半导体的温度，使半导体受到光照，在半导体中加入其他微量杂质等，都可以使半导体的导电性能成百万倍地发生变化。这种性能是导体和绝缘体所没有的。正因为半导体具备这种特性，人们用半导体制成了热敏电阻、光敏电阻、晶体管等各种电子元件，并且发展成为集成电路。把晶体管以及电阻、电容等元件，同时制作在很小的一块半导体晶片上，并且把它们按照电子线路的要求连接起来，使之成为具有一定功能的电路，这就是集成电路。

三、超导体

金属的电阻率随温度的降低而减小。人们发现，有些物质当温度降低到绝对零度附近时，它们的电阻率会突然减小到无法测量的程度，可以认为它们的电阻率突然变为零，这种现象叫做超导现象，能够发生超导现象的物质称为超导体。材料由正常状态转变为超导状态的温度，叫做超导材料的转变温度 T_c。例如铅的转变温度 $T_c=7.0K$，水银的转变温度 $T_c=4.2K$，铝的转变温度 $T_c=1.2K$，镉的转变温度 $T_c=0.6K$。

超导体的电阻率几乎为零，如果用超导体材料制成一个闭合线圈，在这个线圈里一旦激发出电流，不需要电源，电流就可以持续几十天而不减小，并且发热的功率很小。

在远距离输电中，如果使用超导输电线，将可避免电能的大量消耗。在大型的电磁铁和电机中，通过线圈的电流很强，损耗的电能很多，如果用超导材料做成线圈，耗损的功率大大降低，则可以制成强大功率的超导电磁铁和超导电机。各种电子器件如果能实现超

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

导化，将会大大提高它们的性能；电子计算机实现超导化，将使个人计算机具有超级计算机的性能。超导体的应用具有十分诱人的前景。

超导材料的转变温度很低，要维持这样低的温度，在技术上是非常困难的。几十年来，科学家们积极进行高温超导的研究，我国的研究工作走在世界的前列，1989 年，我国科学家发现了转变温度 $T_c=130\text{K}$ 的超导材料。目前在世界范围内掀起了高温超导研究的热潮，期望得到在室温下就能工作的超导材料，以便使它能有广泛的实际应用。

第四节　电荷和电场

一、电荷间的相互作用

1. 库仑定律

自然界的电荷只有两种，即正电荷和负电荷。用绸子摩擦过的玻璃棒所带的电荷是正电荷；用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷是负电荷。电荷之间有相互作用，同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。电荷间作用力的大小跟什么有关系呢？

法国物理学家库仑（1736 年—1806 年），用精确的实验研究了静止的点电荷间的相互作用力，于 1785 年发现了后来用他的名字命名的定律。

真正的点电荷是不存在的，但是，如果带电体间的距离比它们的大小大得多，以致带电体的形状和大小对相互作用力的影响可以忽略不计时，这样的带电体就可以看成是点电荷。点电荷是一种理想化的模型。

库仑实验的结果是：在真空中两个点电荷间的作用力跟它们的电量的乘积成正比，跟它们间的距离的平方成反比，作用力的方向在它们的连线上。这就是库仑定律。电荷间的这种作用力叫做静电力，又叫做库仑力。

如果用 Q_1、Q_2 表示两个点电荷的电量，用 r 表示它们间的距离，用 F 表示它们间的静电力，库仑定律就可以写成下面的公式：

$$F=k\frac{Q_1Q_2}{r^2}$$

式中 k 是比例常量，叫做静电力常量。

在国际单位制中，电量的单位就是库仑，简称库，符号是 C。如果上面公式中的物理量都用国际单位制的单位，即力的单位用牛，距离的单位用米，电量的单位用库，由实验得出 $k=9.0\times10^9\,\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$。

2. 元电荷

我们知道，电子带有最小的负电荷，质子带有最小的正电荷，它们的电量的绝对值相等。一个电子的电量 $e=-1.60\times10^{-19}\text{C}$。

所有的实验还指出，任何带电的粒子，所带电量或者等于电子或质子的电量，或者是它们的电量的整数倍。因此，人们自然地把 1.60×10^{-19} 库叫做元电荷。科学家在研究原子、原子核以及基本粒子中，为了方便，常常用元电荷作为电量的单位。

3. 电荷守恒定律

在摩擦起电中，一个物体失去一些电子而带正电，同时另一个物体得到这些电子而带

等量的负电。摩擦起电并不是创造了电荷，只是电荷从一个物体转移到另一个物体。大量事实说明：电荷既不能创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分。这个结论叫做电荷守恒定律。它是物理学中重要的基本定律之一。

4. 静电感应

如图 1-21 所示，把带正电荷的 C 球移近彼此接触的导体 A 和 B，可以看到 A、B 上的金属箔片都张开，这表明 A、B 都带上了电荷。如果先把 C 移走，A 和 B 上的金属箔片就会闭合。如果先把 A 和 B 分开，再移走 C，可以看到 A、B 上的金属箔片仍张开，接着让 A 和 B 接触，它们的金属箔片都闭合，这证明 A 和 B 分开后所带的是异种等量的电荷，重新接触后等量异种电荷发生中和。

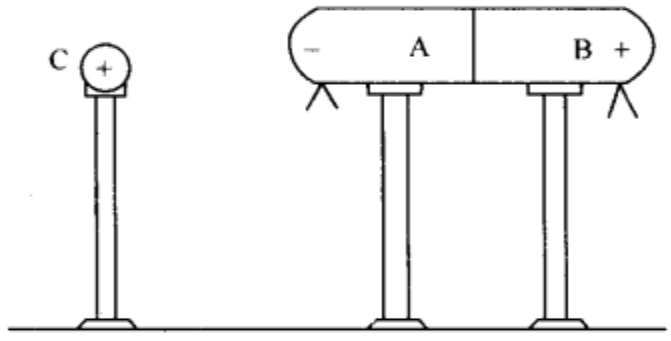


图 1-21　静电感应

把电荷移近不带电的导体，可以使导体带电的现象，叫做静电感应。利用静电感应使物体带电，叫做感应起电。感应起电没有创造电荷，而是使物体中的正负电荷分开，将电荷从物体的一部分转移到另一部分。

归纳总结：使物体带电的三种方法

①接触带电：将不带电体与带电体接触，则不带电体带了电。接触带电的特点是带同性电荷，但所带电量不一定与带电体电量相等。如果导体完全相同，接触后各带一半电量（不同的导体接触，电量的分配应按各自电容量的大小分配）。

②摩擦带电：这种带电特点是相互摩擦的两物体分别带有等量异种电荷。

③静电感应带电：当不带电导体靠近带电体时，由于静电感应，在该导体两端产生等量异种电荷。

二、电场强度和电场线

1. 电场

两个电荷相互作用时并不直接接触，它们之间的相互作用是通过物质作媒介而发生的，这种物质就是电场。

只要有电荷存在，在电荷的周围就存在着电场。把一个电荷放入电场中，它就要受到力的作用，这种力叫做电场力。A、B 两个电荷相互作用时，A 电荷受到 B 电荷的作用，实际上是 B 电荷的电场对 A 电荷的作用。同样，B 电荷受到 A 电荷的作用，实际上是 A 电荷的电场对 B 电荷的作用。

2. 电场强度

放入电场中某一点的电荷受到的电场力跟它的电量的比值，叫做这一点的电场强度，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

简称场强，通常用 E 表示，即

$$E=\frac{F}{q}$$

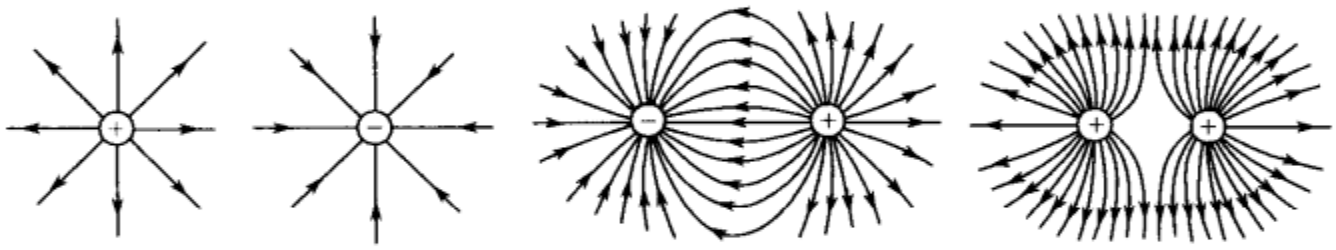
电场强度的单位是牛/库，符号是 N/C。如果 1 库的电荷在电场中的某一点受到的电场力是 1 牛，这一点的电场强度就是 1 牛/库。

电场强度跟力一样，也是矢量。人们规定电场中某点的场强方向跟正电荷在该点所受电场力的方向相同。

3. 电场线

如果能够用图形把电场中各点场强的大小和方向形象地表示出来，这对人们认识电场是很有好处的。英国物理学家法拉第(1791 年—1867 年)提出了用电场线来表示电场的方法，现在被普遍采用。

在任何电场中，每一点的场强 E 都有一定的方向，所以可以在电场中画出一系列从正电荷出发到负电荷终止的曲线，使曲线上每一点的切线方向都跟该点的场强方向一致，这些曲线就叫做电场线。应该注意，电场线并不是电场里实际存在的线，而是人们为了使电场形象化而假想的线。图 1-22(a)是点电荷的电场线，图 1-22(b)是两个等量的点电荷的电场线。从图中可以看出，在离产生电场的电荷较近的地方，也就是场强越大的地方，电场线越密。所以，用电场线来表示电场时，场强越大的地方电场线越密，场强越小的地方电场线越稀。



(a)　　(b)

图 1-22　电场线分布

(a)点电荷电场的电场线分布；(b)两个等量点电荷电场的电场线分布。

4. 均匀电场

在电场的某一区域里，如果各点场强大小和方向都相同，这个区域的电场就叫做均匀电场，也称匀强电场。两块靠近、正对且等大的平行金属板，分别带等量正负电荷时，它们之间的电场是匀强电场(边缘附近除外)，电场线如图 1-23 所示，从图中可以看出，匀强电场的电场线是互相平行的直线，且线间距离相等。

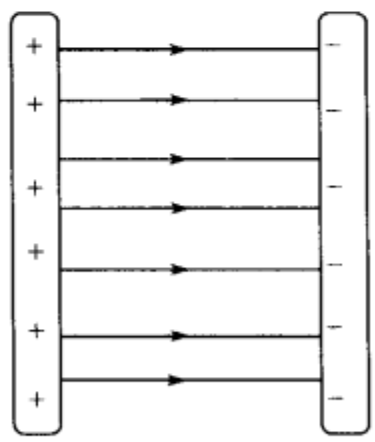


图 1-23　匀强电场

5. 电场的叠加

如果有几个点电荷同时存在，它们的电场就互相叠加，形成合电场。这时某点的场强等于各个点电荷在该点产生的场强的矢量和。

三、电场中的导体

1. 静电平衡

把一个不带电的金属导体 ABCD 放到场强为 E_0 的电场中，导体内部的自由电子受到

原书缺页

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

原书缺页

度为零，把室内吊灯与室内地面的高度差作为吊灯的高度。类似地，如果在电场中选择某一参考点，也可以由电势差定义电场中各点的电势。

设 A、O 两点的电势差为 U_{AO}，如果选择电场中的 O 点作为参考点，取参考点的电势为零。定义 A 点的电势 U_A 为：

$$U_A = U_{AO}$$

这就是说，电场中某点的电势在数值上等于单位正电荷由该点移至参考点（零电势点）时电场力所做的功。电势在电路中也叫电位，电势的单位与电势差的单位相同，也是伏特。

例如，单位正电荷由 A 点移至参考点 O 时电场力所做的功为 5 焦，则 A 点的电势 $U_A = 5$ 伏，A 点的电势高于 O 点的电势。单位正电荷由 B 点移至参考点 O 时电场力所做的功为 -3 焦，则 B 点的电势 $U_B = -3$ 伏，B 点的电势低于 O 点的电势。

有了电势的概念，就可以由电势的差值表示电势差，即

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

电势是一个相对量，孤立地谈某点电势的高低和正负是没有意义的。参考点不同，各点的电势也不同，但参考点的变化，虽然影响各点的电势，却并不改变电场，不改变电场中两点的电势差，如同高度这类物理量一样，只有相对于确定的参考点，它才有确定的物理意义，选不同的参考点，会使高度值不同，但两点间的高度差是不变的。正因为不同的电势可以描述同一电场，所以电场中允许零电势点选择具有任意性。虽然零电势的选取是任意的，但在实际应用中，通常取无穷远处或大地的电势作为零参考点。

在电场中，可以根据电场线的方向判断电势的高低。沿着电场线的方向将单位正电荷由 A 点移至 B 点，电场力做正功，$U_{AB} > 0$，即 $U_A > U_B$。这就是说，沿着电场线的方向，电势越来越低。

3. 等势面

在地图上，常用等高线来表示地形的高低，与此相似，在电场中常用等势面来表示电势的高低。电场中电势相同的各点构成的面叫做等势面。

在同一等势面上，任何两点间的电势差为零，所以在同一等势面上移动电荷时电场力不做功。

等势面一定与电力线垂直，即与场强的方向垂直。假如不是这样，场强就有一个沿着等势面的分量，在等势面上移动电荷时电场力就要做功，而这是不可能的。

沿着电场线的方向电势越来越低，所以电场线不但跟等势面垂直，而且总是由电势高的等势面指向电势低的等势面。

图 1-26 是几种常见的电场中的等势面。

处于静电平衡状态的导体，内部的场强为零，在任意两点间移动电荷都不做功，所以任意两点间的电势差为零，整个导体是个等势体，导体表面是个等势面。

地球是个大导体，在静电平衡状态的地球以及与它相连的导体都是等势体。实际中常取地球或与地球相连的导体作为参考位置，认为它们的电势为零。

实际中测量电势比较容易，所以常用等势面来研究电场。先测绘出等势面的形状和分布，再根据电场线和等势面处处垂直这一特点，绘出电场线的形状和分布，就可以知道

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

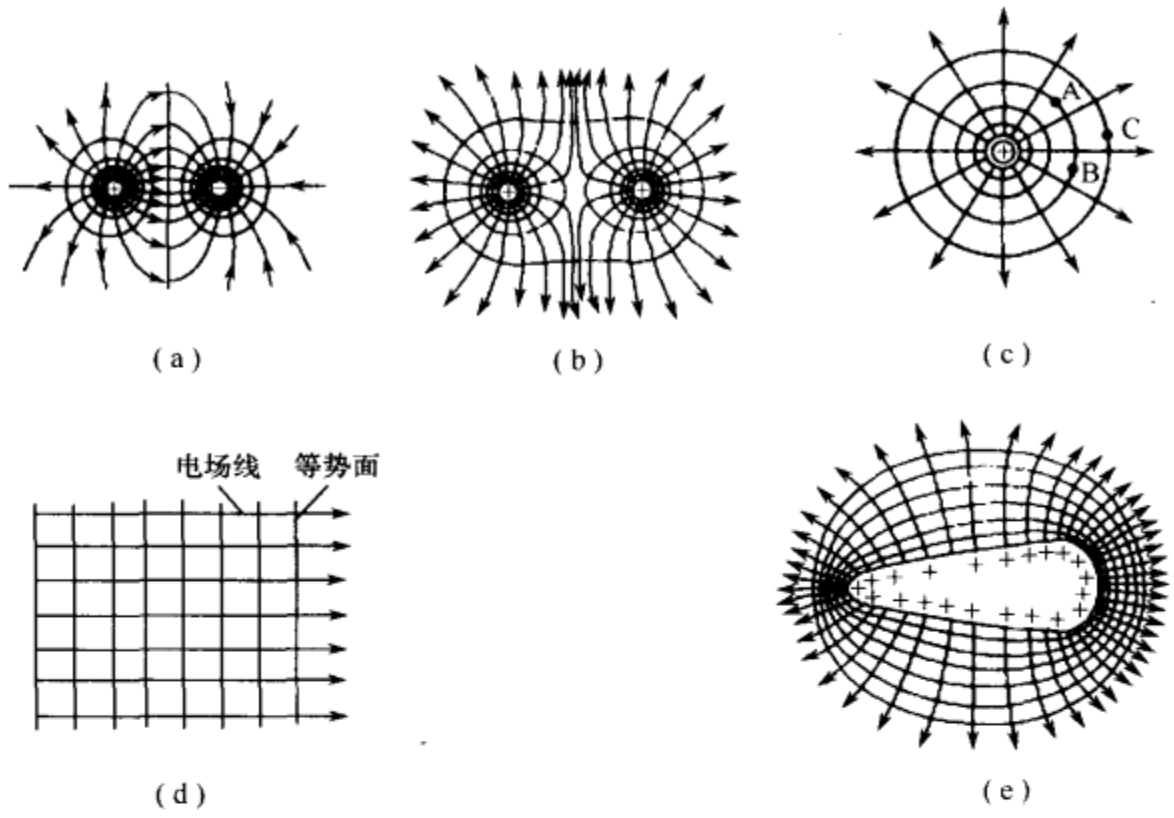


图 1-26　几种常见电场中的等势面

(a)等量异种点电荷的等势面；(b)等量同种点电荷的等势面；

(c)点电荷电场的等势面是以点电荷为球心的一族球面；

(d)匀强电场的等势面是垂直于电场线的一族平面；(e)带电导体周围的等势面和电场线。

整个电场的分布。

4. 电势差跟电场强度的关系

图 1-27 表示某一匀强电场的等势面和电场线。设 A、B 间的距离为 d，电势差为 U，场强为 E。把正电荷 q 从 A 移到 B，电场力做的功 $W=Fd=qEd$，而 $W=qU$，可见：

$$U=Ed$$

这就是说，在匀强电场中，沿场强方向的两点间的电势差等于场强和这两点间距离的乘积。

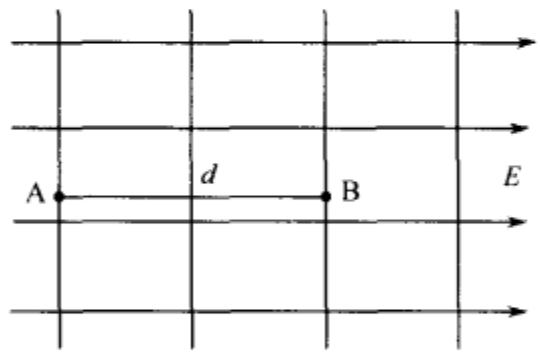


图 1-27　电势差跟电场强度的关系

把上式改写成：

$$E=\frac{U}{d}$$

这个等式说明，在匀强电场中，场强在数值上等于沿场强方向每单位距离上的电势差。

由上式可以得到场强的另一个单位：伏特/米。

阅读材料：尖端放电和避雷针

电荷在导体表面的分布与导体表面的曲率有关。导体表面突出和尖锐的地方(曲率较大)，电荷分布得比较密集，导体表面附近的电场较强；表面比较平坦的地方(曲率较小)，电荷分布得比较稀疏，附近的电场较弱。这一点从图 1-26(e)可以大致分析得出。图 1-26(e)中各相邻等势面间的电势差是相等的。导体左右两端的曲率较大，附近的等

势面比较密集；中部比较平坦，附近的等势面比较稀疏。如果把电场的各个小区域看作匀强电场，从公式 $U=Ed$ 可知，等势面比较密集的地方，场强比较大，导体上电荷的分布也比较密集。

由于导体尖端上的电荷特别密集，因此，尖端附近的电场特别强，容易使空气中的气体分子发生电离，与尖端带同种电荷的离子受到排斥，远离尖端；与尖端带异种电荷的离子受到吸引，移向尖端，与尖端上的电荷中和。这相当于导体从尖端失去电荷，所以叫做尖端放电。尖端放电时，在它周围往往隐隐地笼罩着一层电晕，在黑暗中特别明显。高压输电的导线，表面要很光滑，半径不能过小（即曲率不能过大），以避免因放电而损失电能。高压设备的金属元件要做成光滑的球面，防上尖端放电，以保持高电压。

避雷针就是利用尖端放电的原理制成的。带电的云层接近地面时，由于静电感应，地面上的物体出现异种电荷，并且密集在突出的物体上，如大树、烟囱、铁塔、高层建筑物等。感应出的电荷积累到一定程度，带电云层和这些物体之间会发生强烈的放电，这就是雷击。避雷针是一个金属的尖端导体，安在建筑物的顶端，用粗导线与埋在地下的金属板连接，以保持与大地接触良好。通过避雷针可以不断地放电，避免电荷的大量积累，从而达到避雷的目的。

五、静电的防止和应用

摩擦产生的静电给人们生产、生活带来很多麻烦，甚至造成危害。印刷厂里，纸页之间的摩擦起电，会使纸页粘在一起，难于分开，给印刷带来麻烦。印染厂里，棉纱、毛线、人造纤维上的静电，会吸附空气中的尘埃，使印染质量下降。

静电荷积累到一定程度，会产生火花放电。在地毯上行走的人，与地毯摩擦产生的静电如果足够多，在去拉金属门把手时，手与金属把手间会产生火花放电，严重时会使其痉挛。在大气中飞行的飞机，与空气摩擦产生的静电如果在着陆过程中没有导走，当地勤人员接近机身时，人与飞机间可能产生火花放电，严重时可能将人击倒。专门用来装汽油或柴油等液体燃料的卡车，在灌油、运输过程中，燃油与油罐摩擦、撞击而产生静电，如果没有及时导走，积累到一定程度，会产生电火花，引起爆炸。

防止静电危害的基本办法，是尽快把产生的静电导走，避免越积越多。具体措施则多种多样。油罐车是靠一条拖在地上的铁链把静电导走。飞机机轮上通常都装有搭地线，也有用导电橡胶做机轮轮胎的，着陆时它们可将机身的静电导入地下。在地毯中夹杂 0.05mm～0.07mm 的不锈钢丝导电纤维，消除静电的效果很好。在印染厂中保持适当的湿度，潮湿的空气可使静电荷很快消失。

当然，静电也可以用来为人们服务。目前，静电的应用已有多种，但依据的物理原理几乎都是让带电的物质微粒在电场力作用下，奔向并吸附到电极上。以煤为燃料的工厂、电站，每天排出的烟带走大量的煤粉，不仅浪费燃料，而且造成严重的环境污染。可以利用静电除尘器消除烟气中的煤粉。此外，静电还广泛应用于静电喷涂、静电植绒、静电复印等方面。

六、带电粒子在匀强电场中的运动

带电粒子在电场中受到电场力的作用，会产生加速度，速度的大小和方向都可以发生

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

变化。在现代科学实验和技术设备中，常常据此，利用电场来改变或控制带电粒子的运动。这种应用大致可以分成两种情况：一是利用电场使带电粒子加速，一是利用电场使带电粒子偏转。

1. 带电粒子的加速

在真空中有一对平行金属板，两板间加以电压 U。有一个带正电荷 q 的带电粒子，在电场力的作用下，由静止开始从正极板向负极板运动，到达负极板时的速度 v 有多大？根据力学和电学知识就可以解决这个问题。带电粒子由正极板移向负极板的过程中，电场力所做的功 $W=qU$。设 q 是在正极板处由静止开始运动，到达负极板时的动能为 $\frac{1}{2}mv^2$，根据动能定理得到

$$qU=\frac{1}{2}mv^2$$

由此得到电荷 q 到达负极板的速度为

$$v=\sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

我们知道，两平行金属板间的电场是匀强电场。如果两极板不是平行金属板，而是其他形状，中间的电场将是非匀强电场。这时 $v=\sqrt{\frac{2qU}{m}}$ 式仍然成立。这是因为不论在什么电场中，电荷 q 通过电压 U 时，电场力对它做的功总等于 qU。

2. 带电粒子的偏转

要使以一定速度运动的带电粒子偏转，可以有两个办法：一是利用磁场，这将在以后章节中讨论，一是利用电场。利用电场使带电粒子偏转，人们通常用与带电粒子初速度方向垂直的匀强电场，这时带电粒子受到一个与原来运动方向垂直的电场力，因而发生偏转。

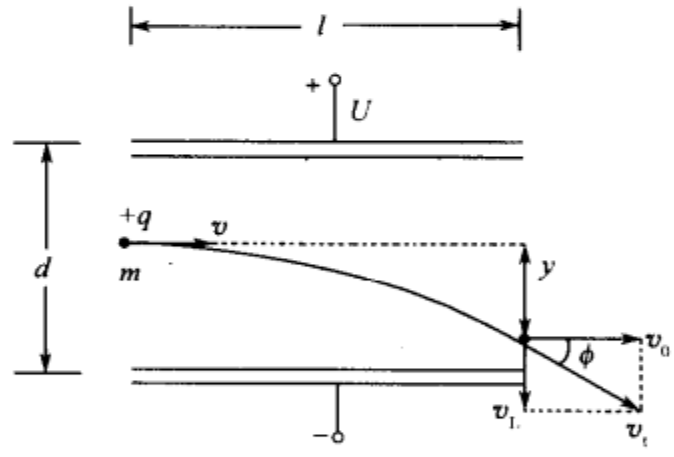


图 1-28　带电粒子的偏转

如图 1-28 所示，一对水平放置的平行金属板相距为 d，板长为 l，两板间所加电压为 U。一带电粒子的质量为 m，电量为 $+q$，以垂直场强方向的初速度 v_0 进入电场，带电粒子通过电场将做匀变速曲线运动，经计算，可求出偏转的距离 y 及离开电场时的速度 v_t 的大小、偏转角度 ϕ 分别是

$$y=\frac{qUl^2}{2mdv_0^2}$$

$$v_t=\sqrt{v_0^2+\left(\frac{qUl}{mdv_0}\right)^2}$$

$$\tan\phi=\frac{qUl}{mdv_0}$$

阅读材料：示波管

示波器是电子测量中重要的仪器，其核心部件是示波管，示波管和电视显像管的原理十分相似，都是利用了电子束的聚焦和偏转，因此统称为电子束管，但示波管采用的是电聚焦和电偏转，而显像管则是电聚焦和磁偏转。

示波管是一种电子射线管，其结构如图 1-29 所示。主要由电子枪、偏转电极和荧光屏组成，管内的真空度很高，可达 10^{-4} Pa，在这样的高度真空下，它是采用热电子发射的方式来产生电子射线的。灯丝通电后温度升高，给阴极加热，使阴极发射电子，电子经过圆筒形的控制极和阳极的小孔，形成一束很细的加速的电子束，用来产生电子束的这一部分装置通常叫做电子枪。从电子枪射出的电子束，打在管底的荧光屏上，形成一个小的亮斑，亮斑的大小和亮度由加在控制极和阳极上的电压来控制。

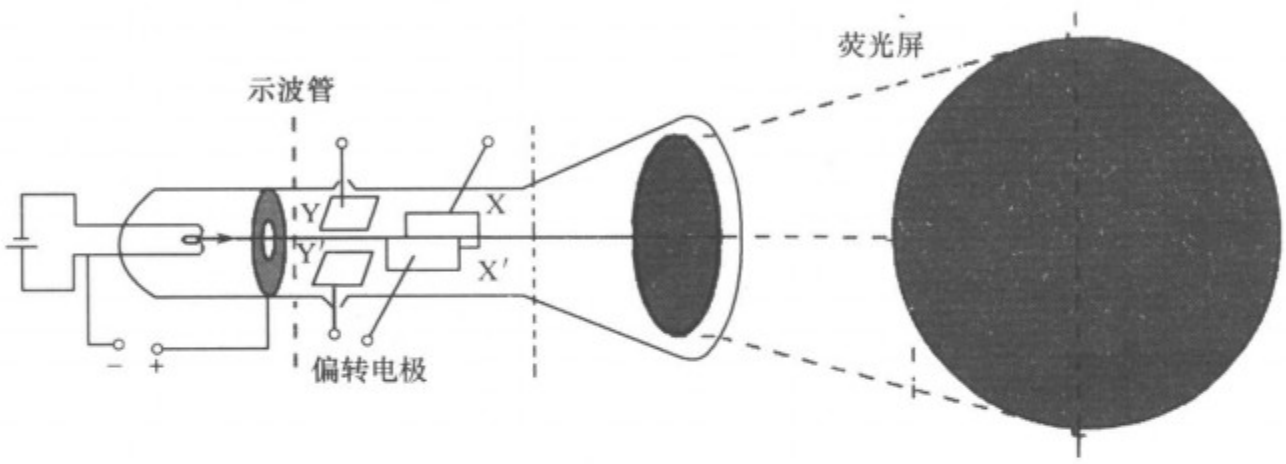


图 1-29　示波管的结构(偏转电极没有电压)

如果偏转电极没有加电压，电子束从金属板小孔穿出后将沿直线前进，打在荧光屏上，在那里产生一个小的亮斑。

若在示波管中偏转电极 Y 和 Y′加偏转电压，电子束将在竖直方向上运动，改变加在偏转电极 Y 和 Y′上的电压 U，亮斑在竖直方向的位置也随着改变。当 Y′的电势高于 Y 的电势时，亮斑移向下方，当 Y 的电势高于 Y′的电势时，亮斑移向上方，且亮斑的偏移与 U 成正比。当 U 随着时间而变化时，亮斑的位置也随着时间而改变。可见，亮斑在竖直方向偏移的规律与电压变化的规律应当是相同的。如果电压按正弦(或余弦)规律变化，偏移也按正弦(或余弦)规律变化，即亮斑在竖直方向的运动是简谐振动。当电压变化很快时，亮斑的移动也很快，由于视觉暂留和荧光物质的残光特性，在荧光屏上亮斑的移动看起来成了一条竖直的亮线，如图 1-30 所示。

同样的道理，如果只在偏转电极 X 和 X′上加电压，光斑就在水平方向发生偏移。加上随时间而变化的电压，亮斑的位置就在水平方向随时间而改变。加上特定的周期性变化的电压，可使亮斑在水平方向这样运动：亮斑从一侧匀速地移至另一侧，然后迅速返回原处，再匀速地移向另一侧，如此反复进行。这个过程叫做扫描，所加电压叫做扫描电压。如果扫描电压变化很快，亮斑看起来成了一条水平的亮线，如图 1-31 所示。

通常，加在 Y 和 Y′上的电压是周期性变化的，如果扫描电压的周期与 Y 和 Y′板上电压的周期相同，并且起始时间也相同(又称同步)，那么，在荧光屏上就可以看到一条稳定的图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

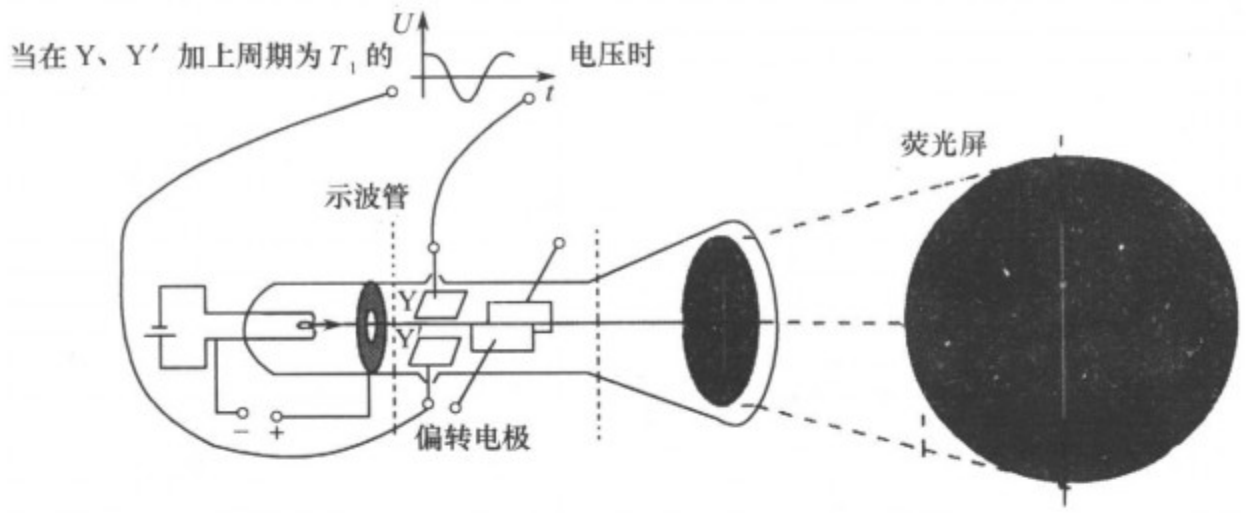


图 1-30　在示波管中偏转电极 Y 和 Y′加正弦(或余弦)偏转电压时

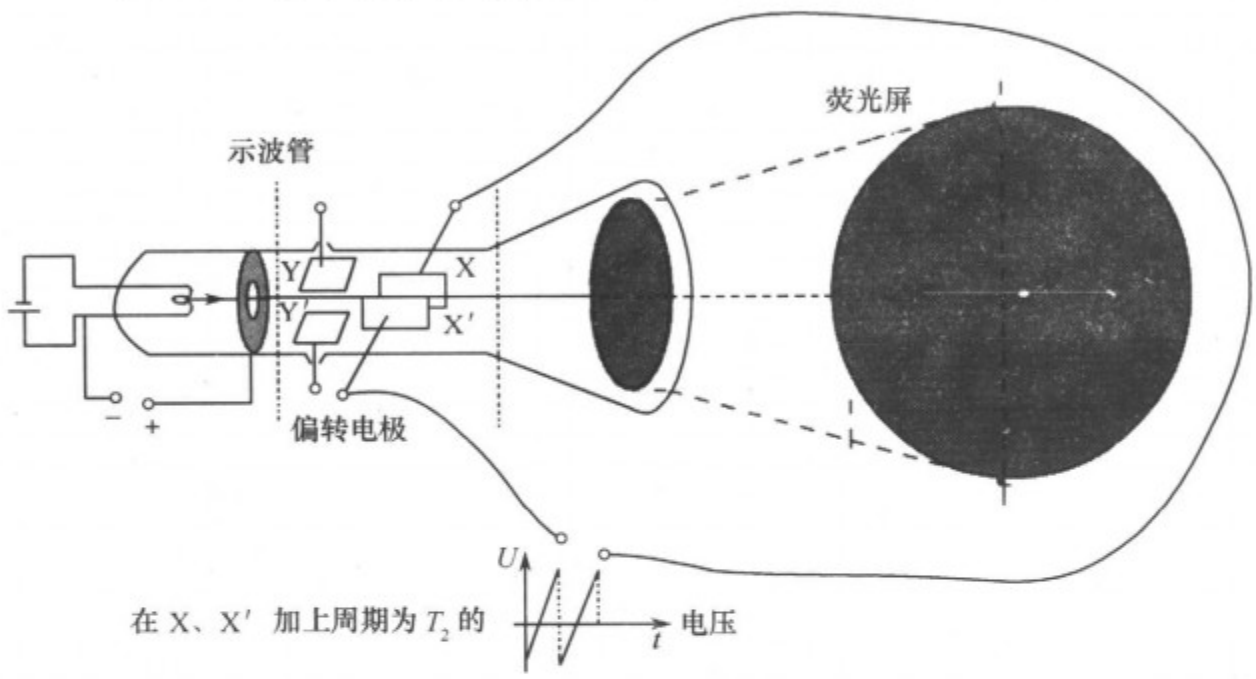


图 1-31　在示波管中偏转电极 X 和 X′加锯齿波偏转电压时

线。这时得到的图线表示出竖直极板上的电压在一个周期内随时间而变化的规律。例如，加在 Y 和 Y′板上的电压是随时间按正弦或余弦规律变化的，它的变化周期与扫描电压的周期相同，起始时间也相同，那么在荧光屏上就显示出一条正弦或余弦曲线，如图 1-32 所示。

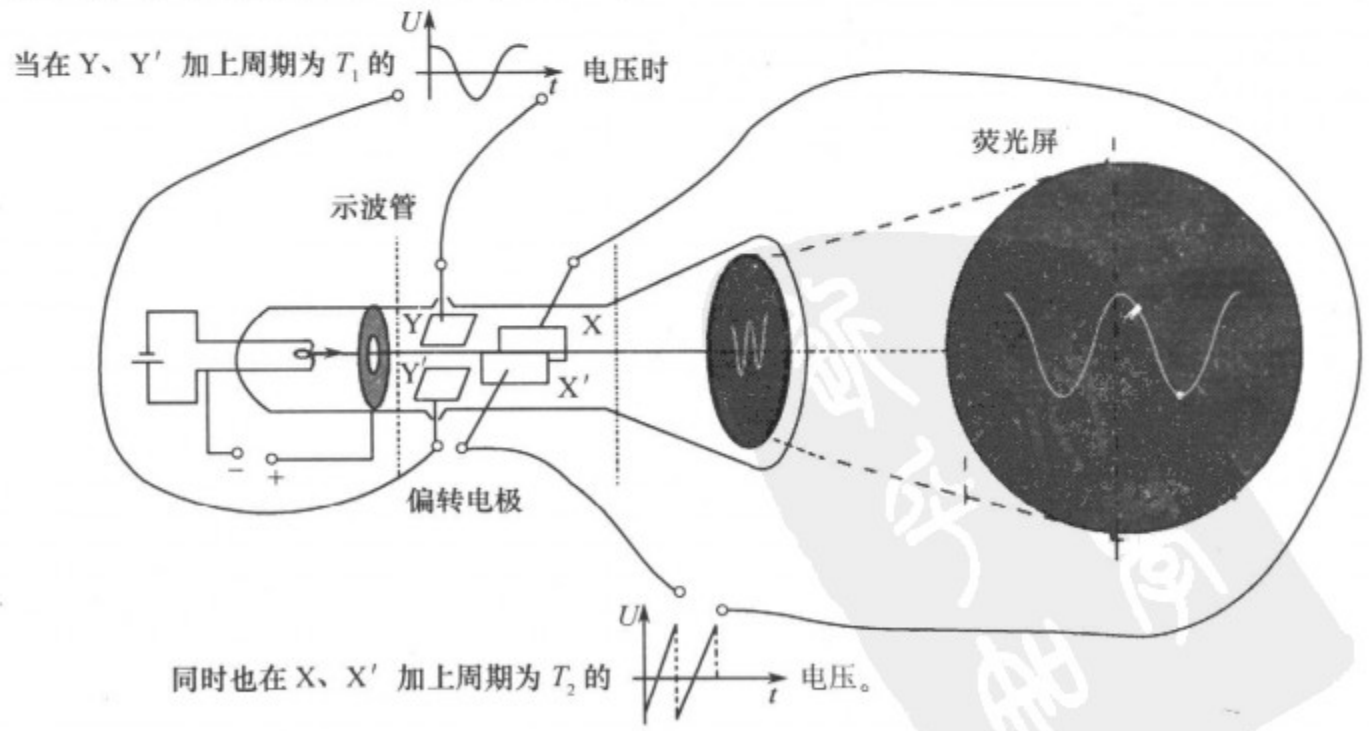


图 1-32　在示波器的偏转电极上同时加上电压

第五节　电容器

一、电容器的定义

电容器是电气设备中的一种重要元件，在电子技术和电工技术中有很重要的应用。在两个平行金属板中间夹上一层绝缘物质（也称电介质），就组成一个最简单的电容器，叫做平行板电容器。这两个金属板叫做电容器的两个极。

电容器可以容纳电荷。使电容器带电叫做充电。充电时，把电容器的一个极板与电池组的正极相连，另一个极板与电池组的负极相连，两个极板就分别带上了等量的异种电荷。电容器的一个极板上所带电量的绝对值，叫做电容器所带的电量。充了电的电容器的两极板之间有电场。

使充电后的电容器失去电荷叫做放电。用一根导线把电容器的两极接通，两极上的电荷互相中和，电容器就不再带电，两极之间也不再存在电场。

电容器带电的时候，它的两极之间产生电势差。实验表明，任何一个电容器，两极间的电势差都随所带电量的增加而增加，且电量与电势差成正比，它们的比值是一个恒量。不同的电容器，这个比值一般是不同的。可见，这个比值表征了电容器的特性。电容器所带的电量 Q 与它的两极间的电势差 U 的比值，叫做电容器的电容。如果用 C 表示电容，则有

$$C=\frac{Q}{U}$$

上式表示，电容在数值上等于使电容器两极间的电势差为 1 伏时，电容器需要带的电量。这个电量大，电容器的电容就大。可见，电容是表示电容器容纳电荷本领的物理量。

在国际单位制里，电容的单位是法拉，简称法，国际符号是 F。一个电容器，如果带 1 库的电量时两极间的电势差是 1 伏，这个电容器的电容就是 1 法。法这个单位太大，实际上常用较小的单位：微法（μF）、纳法（nF）和皮法（pF）。它们间的换算关系是：$1\text{F}=10^{6}\,\mu\text{F}=10^{9}\,\text{nF}=10^{12}\,\text{pF}$。

二、电容器的分类

电容器的种类很多，从构造上看，常用的电容器可分为固定电容器和可变电容器两类。固定电容器的电容是固定不变的，常用的有非电解电容器和电解电容器。

非电解电容器是没有极性的，也就是说可以在电路中任意连接而不必担心“＋、－”极性问题。电子电路中最常用的是圆片电容。另外还有瓷片电容、云母电容。在大多数应用电路中都使用瓷片电容，这种电容是褐色的，形状像瓦片，其电容值的范围可以几 pF 到 1μF（也可以找到具有较高容值的无极性电容，这种电容器上标有 NP 字样，表示该电容器无极性。

电解电容器是有极性的电容器，在电路中必须按要求连接，其“＋”和“－”端必须连接到电路中的指定位置。与非电解电容器相比，电解电容器体积较大，因此尽量避免使用电解电容器。只有在需要较大的容值时才使用。并且，电解电容器不很稳定，其电容值会随

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

着温度和其他参数的变化而发生微小改变。相对而言，非电解电容器要稳定些。电解电容器的容值一般在 1μF 到 4700μF 之间，价格也更贵一些。需要注意的是，如果将电解电容器的极性连错，将发生炸裂现象。

可变电容器的电容是可以改变的，它由两组铝片组成，固定不动的一组铝片叫定片，可以转动的一组铝片叫动片。转动动片，两组铝片的正对面积发生变化，电容也随之改变。

图 1-33 是电路图中常用的几种电容器的符号。

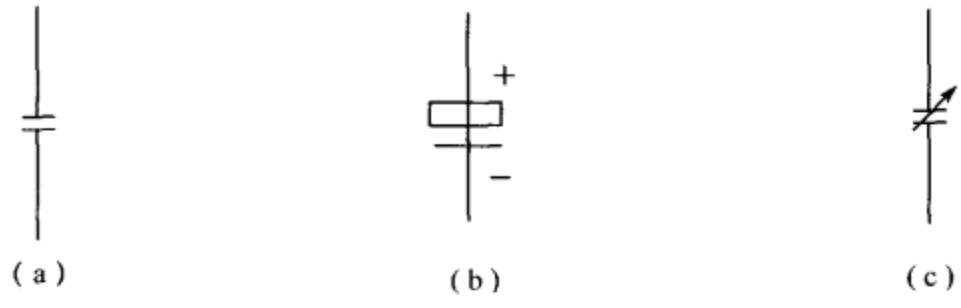


图 1-33　电容器的符号

(a)固定电容器；(b)电解电容器；(c)可变电容器。

释疑解难：分布电容

除电容器外，由于电路的分布特点而具有的电容叫分布电容，例如线圈的相邻两匝之间，两个分立的元件之间，两根相邻的导线间，一个元件内部的各部分之间，都具有一定的电容。它对电路的影响等效于给电路并联上一个电容器，这个电容值就是分布电容。由于分布电容的数值一般不大，在低频交流电路中，分布电容的容抗很大，对电路的影响不大，因此在低额交流电路中，一般可以不考虑分布电容的影响，但对于高额交流电路，分布电容的影响就不能忽略不计了。

三、平行板电容器的电容

理论和实验都表明，平行板电容器的电容 C 与介电常量 ε 成正比，与正对面积 S 成正比，与极板的距离 d 成反比。即：

$$C=\frac{\varepsilon S}{4\pi kd}$$

上式中的 k 为静电力恒量。

一般说来，电容器的电容是由两个导体的大小和形状、两个导体的相对位置以及它们间的电介质决定的。

四、电容器的特性

电容器的特性很多，在分析不同的电路时要用到它不同的特性。只有熟练掌握电容器的主要特性，才能在电路分析过程中灵活运用这些特性去分析电路的工作原理，下面简要介绍电容器的几种常见特性。

1. 隔直特性

所谓隔直特性是指电容器不让直流电流通过。下面以图 1-34 所示电路为例进行分析。

在开关未接通之前，电容器 C 中没有电荷。在开关 S 接通后，直流电源 E 开始对电

容器 C 充电，此时电路中有电流流动；当充电一段时间后，电容器 C 上、下极板上充有图示的电荷，即上极板为正电荷，下极板为负电荷。由于上、下极板之间是绝缘的，所以电容器 C 上、下极板上的正、负电荷不能复合，在电容器上、下极板上的电荷保留住了。

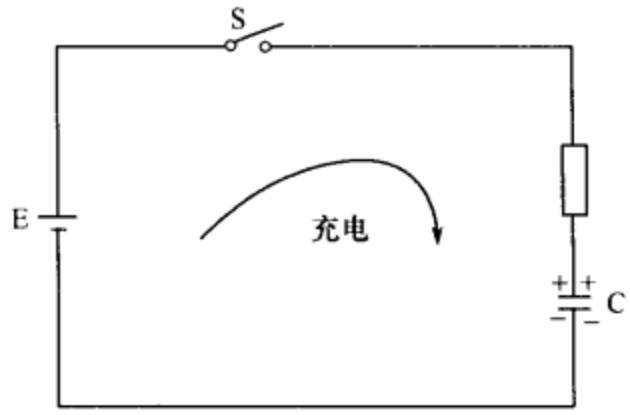


图 1-34　电容器的充电

由于电容器极板上的电荷随着充电进行愈来愈多，电容器两极板之间的电压愈来愈大，当充电到一定程度后，电容器 C 两极板上的电压（上正下负的直流电压）等于直流电源电压 E 时，此时充电结束，由于充电结束后电路中没有电流，因此，电阻 R 两端的电压为 0V。

重点提示：

①当直流电源 E 对电容器 C 充电时，若直流电源的极性不同，则在电容上充到的直流电压极性也不同。

②在直流电源 E 刚加到电容器 C 上时，电路中是有电流流动的，电容器充放电结束时，流过电容器的电流为零，此时电容器相当于“开路”。电路的充电时间与电路电阻 R 和电容 C 的大小有关。

③充电完成后，电容器两端的直流电压大小等于直流电源 E 电压的大小，电阻 R 两端的直流电压为零。

2. 通交特性

所谓通交特性是指电容器可以让交流电流通过。下面以图 1-35 所示电路为例进行分析。

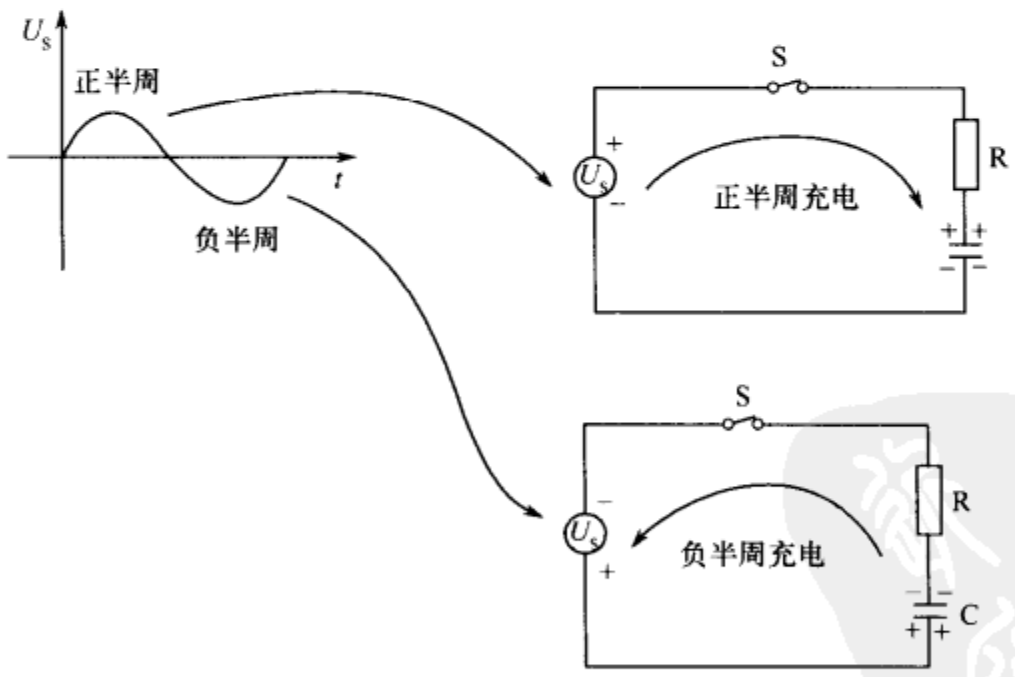


图 1-35　通交特性

电路中，U_s 是交流电源，正、负半周幅度相等。当 U_s 为正半周时，U_s 经开关 S、电阻 R 对电容器 C 充电，使 C 的上、下极板分别得到正电荷和负电荷，在这一充电过程中，流过电阻 R 的电流为顺时针方向，如图 1-35 所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

在 U_s 为负半周时，U_s 经电容 C、电阻 R、开关 S 形成回路，对电容器 C 反向充电，使 C 充有上负下正的电荷。流过电阻 R 的电流为逆时针方向，如图 1-35 所示。

从以上分析可知，在交流电源 U_S 正、负半周，流过电阻 R 的电流方向是改变的，说明流过 R 的电流是交流电流，就是由交流电源 U_S 产生的交流电流。当 U_s 不断变化极性，对 C 的充电方向不断改变时，C 上、下极板上的电荷不断复合、充电，这样电路中便一直有交流电流的流动，等效于 C 能够让交流电流通过，这就是电容器的通交特性。

值得指出的是，电容器 C 两极板之间绝缘，交流电流是不能直接通过两极板形成回路的。只是由于交流电流的充电方向不断改变，使电路中有持续的交流电流流过，等效成 C 能够让交流电流通过。在电路分析中为了方便起见，将电容器看成一个能够“直接”通过交流电流的元件。

在直流电路中，由于直流电压是单方向、不变的，对电容器的充电方向始终不变。待电容器充满电荷之后，电路中便无电流的流动，所以认为电容器具有隔直作用。

电容器的隔直和通交作用往往是联系起来的，即电容器具有隔直通交特性，例如，图 1-36 所示电路，电路中，输入信号 U_i 是一个含有直流电压分量的交流信号，由于电容器 C 的隔直作用，输入信号 U_i 中的直流分量不能通过，因此，在输出端没有直流电压；同时，由于电容器 C 具有通交作用，输入信号 U_i 中的交流电压能够通过电容器 C 和电阻 R 形成回路。在这一回路中产生交流电流，交流电流通过电阻 R 后在 R 两端的交流电压即为输出电压 U_o。所以，输出信号 U_o 中只有输入信号 U_i 中的交流信号成分，而没有直流成分。

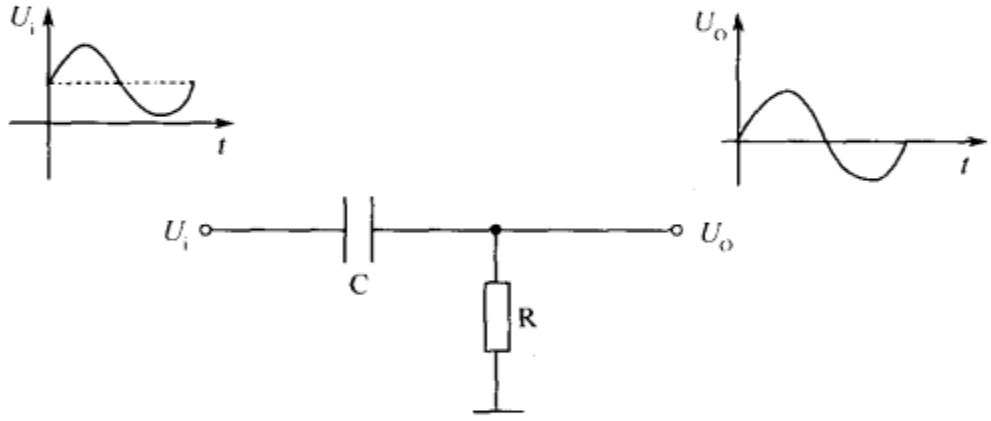


图 1-36　电容的隔直通交特性

3. 储能特性

理论上，电容器不消耗电能，所以电容器中充到的电荷会储存在电容器中，只要外电路不存在让电容器放电的条件，电荷就一直在电容器中，电容器的这一特性称为储能特性。但是，实际上电容器存在着各种能量损耗，它损耗电能，但比电阻器对电能的损耗要小得多。

4. 电容两端电压不能突变

电容器两端电压不能突变的原理可用图 1-37 所示电路进行说明。

在图 1-37(a)所示电路中，在开关 S 未合上时，电容器 C 中无电荷，，即电容器的电荷量 $Q=0$，由 $U=\frac{Q}{C}$ 可知，电容器两端的电压 $U_c=0$V。当开关 S 接通瞬间，由于对 C 的充电要有一个过程，即 C 中的电荷积累要有一个过程，故 S 合上瞬间，C 中电荷仍然为零，所

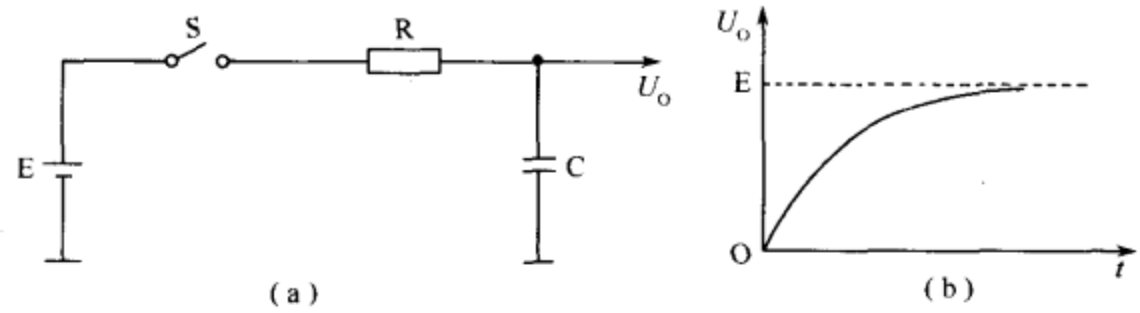


图 1-37　电容器两端电压不能突变

以 C 两端的电压仍为 0V。可见，在 S 接通瞬间，电容器 C 两端的电压不能突变。

当开关 S 接通瞬间，由于 C 两端电压为零，所以，电源电压 E 全部加在电阻 R 上，此时电路中的电流为最大，然后，对电容器 C 充电，C 中有电荷，C 两端有电压，其电压大小按图 1-37(b)所示曲线上升。随着充电的进行，C 两端电压升高，在电阻 R 上的电压下降(R 上的电压等于 E 减去 C 上的电压)，充电电流下降，使 C 中电荷增加量减小，所以 C 两端的电压增大量在减小。直到充电结束，电路中无电流，C 两端的电压等于 E。

电容器两端的电压不能突变的原理对分析电路十分重要，例如，图 1-38(a)所示电路。在接通开关 S 前，C 两端的电压为 0V，在 S 合上瞬间，电容器 C 左端电压等于 E，由于电容器两端电压不能突变，所以，在 S 合上瞬间，电容器 C 的右端电压也为 E，即 C 两端的电压为 0V，R 两端电压为 E。随着充电的进行，C 两端的电压不断上升，R 两端电压不断下降，充电结束后，C 两端电压为 E，R 两端电压为 0V。电容器 C 充电电压曲线如图 1-38(b)所示，输出电压(电阻 R 两端的电压)曲线如图 1-38(c)所示。

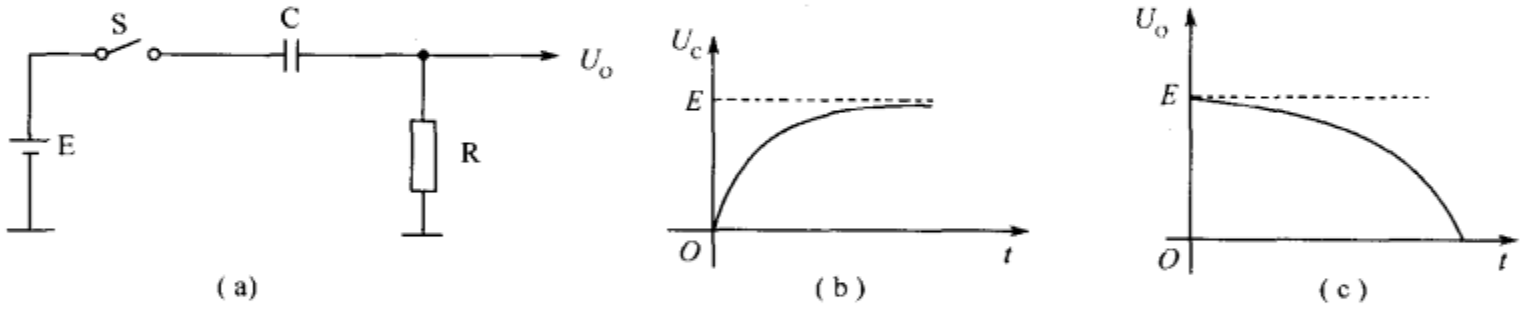


图 1-38　电容器两端电压不能突变

上面讲的是对电容器充电情况，在电容器开始放电的瞬间，电容器两端的电压也不能发生突变。因为只有电容器内部的电荷量发生改变时，电容器两端的电压才能发生改变，刚开始放电时电容器内的电荷还不能放，所以电容器两端的电压不变。

上面讲的都是电容器原先内部没有电荷，若电容器原先内部已经有了电荷，电容器两端便有了一个电压，设为 U_1。当这一电容器刚开始充电或放电时，电容器两端的电压不变，仍然为 U_1。

＊五、电容器的容抗

下面先简要介绍电容器的容抗的概念，后面章节介绍交流电路时还要详细分析。

电容器能通过交流电，当交流信号的频率和电容器的容量不同时，电容器对交流电的阻碍作用——容抗不同。电容器的容抗大小由下列公式决定：

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式中 C 为电容器的电容，f 为交流电的频率，X_C为容抗，单位为欧姆。

电容让交流电通过时对交流电流存在着阻碍作用，容抗的大小与电容器本身的电容 C 的大小和交流电的频率 f 有关。从上面的容抗公式中可以看出，容抗 X_C与频率 f 成反比，即当电容器电容一定时，频率愈高容抗愈小，频率愈低容抗愈大；容抗 X_C与电容 C 也成反比，即当频率一定时，电容愈大容抗愈小，电容愈小容抗愈大。

对于直流电，可看作是 $f=0$ 的交流电，此时，电容器的容抗 $Xc\to\infty$。即对直流电流来说，电容器相当于断路。

*六、电容器的连接

实际使用电容器时，有时会遇到电容器的电容不够或耐压能力不够，这就需要把几个电容器连接起来使用，连接的基本方法有串联和并联两种。

1. 电容器的串联

把几个电容器的极板首尾相接，连成一串，就是电容器的串联。图 1-39 是三个电容器的串联。

接上电压为 U 的电源后，两端极分别带电 $+Q$ 和 $-Q$，由于静电感应，中间各极所带的电量也等于 $+Q$ 或 $-Q$，所以串联时每个电容器带的电量都是 Q。如果各个电容器的电容分别为 C_1、C_2、C_3，电压分别为 U_1、U_2、U_3，那么

$$U_1=\frac{Q}{C_1},U_2=\frac{Q}{C_2},U_3=\frac{Q}{C_3}$$

总电压 U 等于各个电容器上的电压之和，所以

$$U=U_1+U_2+U_3=Q\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}\right)$$

设串联电容器的总电容为 C，则 $U=\frac{Q}{C}$，所以，

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}$$

这就是说，串联电容器的总电容的倒数等于各个电容器的电容的倒数之和。电容器串联之后，相当于增大了两极的距离，因此总电容小于每个电容器的电容。

重点提示：如图 1-40 所示电路中，电容器 C_1、C_2构成串联分压式电路，根据容抗公式

电容器 C_1的容抗　　$X_{C1}=\frac{1}{2\pi fC_1}$

电容器 C_2的容抗　　$X_{C2}=\frac{1}{2\pi fC_2}$

可得出以下结论：

①C_1、C_2上的信号幅度之和等于输入信号幅度，即 $U_1+U_2=U_i$，这一点与电阻串联电路一样。

②电容大的电容器上的电压降小，电容小的电容器上的电压降则大。这是因为电容大的电容器容抗小，相当于电阻小，而在电阻串联电路中，阻值小的电阻上的电压降小。

③在电容器串联电路中，当某一个电容器的电容远大于其他电容器时，该电容器相当

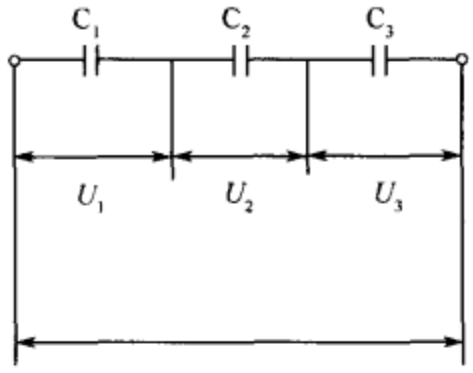


图 1-39　三个电容器的串联

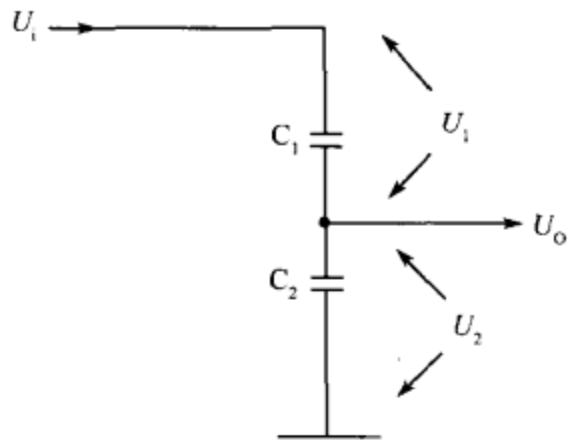


图 1-40　电容分压电路

于呈通路，此时电路中起决定作用的是电容小的电容器。

阅读材料：有极性电容器的串联电路

有极性电容器（主要指电解电容器）的串联电路有两种：顺串联电路和逆串联电路。

①有极性电容器顺串联电路：如图 1-41(a)所示，电路中，C_1 和 C_2 均是有极性的电容器，C_1 的负极与 C_2 的正极相连，这种串联方式称为顺串联电路。有极性电容器顺串联之后，可等效成一个有极性的电容器 C，其极性如图 1-41(b)中所示，即 C_1 的正极为正极，C_2 的负极为负极。

在这种串联电路中，串联后等效电容器 C 的电容减小，总电容的倒数等于各电容的倒数之和。另外，这种串联电路可以提高电容器的耐压，即当 C_1 和 C_2 的电容和耐压均相等时，电容器 C 的电容只有 C_1 和 C_2 的一半，但耐压比 C_1 或 C_2 大一倍。有极性电解电容器的顺串联电路，主要是为了提高电容器的耐压。

②有极性电容器逆串联电路：如图 1-42 所示，这一串联电路有两种，一种是两个电容器的正极相连，见图 1-42(a)所示；另一种是两个电容器负极相连，见图 1-42(b)所示。

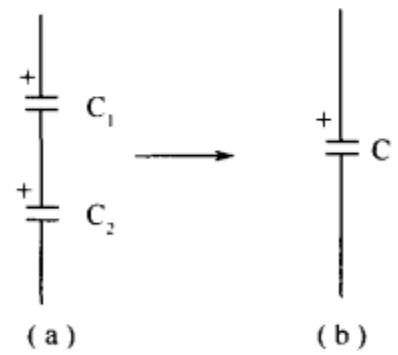


图 1-41　有极性电容器顺串联电路

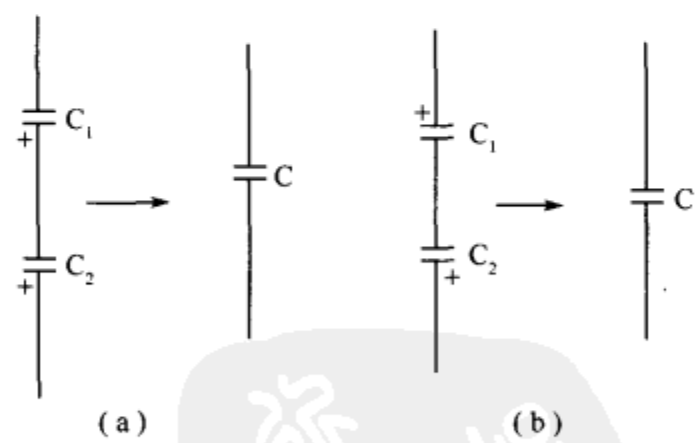


图 1-42　有极性电容器逆串联电路

有极性电容器逆串联之后就没有极性，见图 1-42(a)中右边的等效电路，C 为逆串联后的等效电容。这样串联后的电容器可以作为无极性电容器使用，在一些分频电路中就常用这种电路。但这样的无极性电容器没有真正的无极性电解电容器好。

如图 1-43 所示是实用的有极性电解电容器逆串联电路。电路中，C_2 和 C_3 逆串联后是作为分频电容，在一些低档次的音响设备中会存在这种电路。分频电容器应该是无极性的电容器，因为分频电容器工作在纯交流电路中，见 C_2、C_3 在电路中的位置，流过这两

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

个电容器的电流是很大的交流电流。由于交流电流的极性在不断改变，所以不能用有极性电容器作为分频电容器。在没有无极性的电解电容器时，可以用有极性的电解电容器逆串联后代替。有极性电容器在电路中工作时，它的正极电压应该始终高于负极电压，所以它不能用于纯交流电路中，这样分频电路中的电容器要用无极性电容器。综上所述，在电路中采用有极性电解电容器逆串联电路是为了获得无极性的电容器。

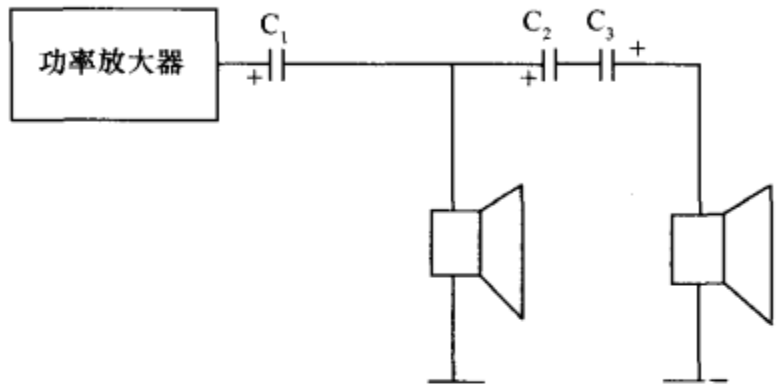


图 1-43　有极性电容器逆串联应用电路

2. 电容器的并联

把几个电容器的正极连在一起，负极也连在一起，这就是电容器的并联。图 1-44 是三个电容器的并联。

接上电压为 U 的电源后，每个电容器的电压都是 U。如果各个电容器的电容分别为 C_1、C_2、C_3，所带电量分别为 Q_1、Q_2、Q_3，那么

$$Q_1=C_1U, Q_2=C_2U, Q_3=C_3U$$

电容器组贮存的总电量 Q 等于各个电容器所带电量之和，所以

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3=(C_1+C_2+C_3)U$$

设并联电容器的总电容为 C，则 $Q=CU$，所以

$$C=C_1+C_2+C_3$$

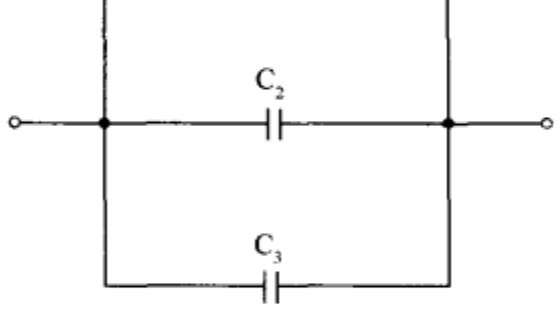


图 1-44　三个电容器的并联

这就是说，并联电容器的总电容等于各个电容器的电容之和。电容器并联之后，相当于增大了两极的面积，因此总电容大于每个电容器的电容。

电容器串联后，电容减小了，但耐压能力提高了，所以需要承受较高的电压时，可以把电容器串联起来；电容器并联后，电容增大了，耐压能力没有提高，所以在需要大电容时，可以把电容器并联起来。

重点提示：

电容器并联电路中，具有以下特点：

①各支路中的电流之和等于总电流。在各支路中，电容大的支路中的电流大，反之则小。这是因为电容大容抗小，电流就大。

②并联电容器中各电容器上的电压相等，这是并联电路的共性。

③在电容器并联电路中，起决定作用的是电容大的电容器，因为电容大容抗小，由电阻并联电路可知，当一个电容器的容抗远比另一个大时，该电容器相当于开路而不起主要作用。

阅读材料：常用电容器并联电路

电路中，两个电容器甚至更多个电容器并联的情况很多，归纳起来主要有下列几种情况：

①一大一小电容并联。一个电容很大的电容器（如电解电容器）与一个电容很小的电容器（如瓷片电容器）并联，如图 1-45 所示。电路中，C_1 是一个大电容的滤波电容器。C_2 是一个小电容的高频滤波电容器，这种一大一小电容相并联的电路在电源电路中十分常见。

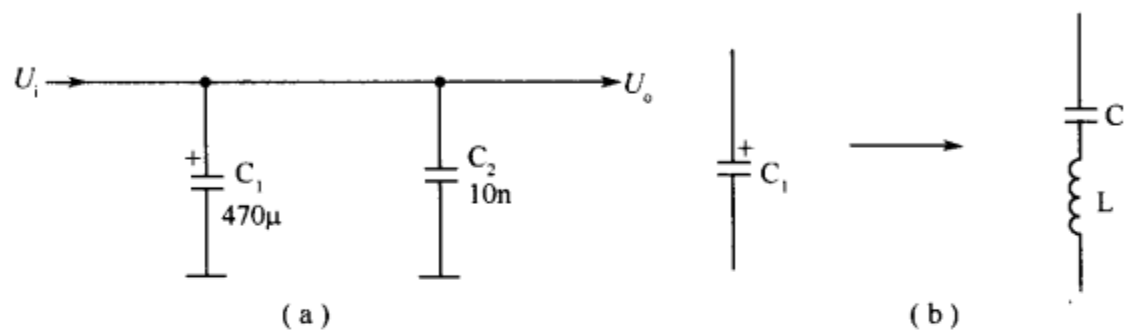


图 1-45　一大一小电容并联

从理论上讲，在同一频率下，电容大的电容器其容抗小，这样一大一小电容并联后，电容小的电容器 C_2 不起作用。但由图 1-45(b)的等效电路可知，大电容的电容器除具有电容大外，由于其结构的原因还具有感抗特性，根据电感的有关特性可知，感抗与频率成正比。这样，大电容工作在高频状态下时，虽然纯电容容抗几乎为零，但感抗却很大，容抗与感抗串联。由串联电路可知，此时总的阻抗仍然很大，且呈感抗的特性。这样，大电容在高频情况下阻抗反而大于低频时的阻抗。

为了补偿大电容的不足，再并一个小电容 C_2。由于小电容器的电容小，在制造时可以克服电感特性，所以小电容几乎不存在电感。当电路的工作频率高时，虽然小电容器的电容小，但由于工作频率高，小电容的容抗也已经很小，这样高频的干扰信号通过小电容器 C_2 滤波到地。

在一大一小电容器相并联的电路中，当电路的工作频率较低时，小电容 C_2 不工作（因小电容的容抗大而呈开路状态），此时主要是大电容 C_1 在工作。当工作频率高时，大电容 C_1 处于开路状态而不工作，小电容 C_2 的容抗远小于 C_1 的阻抗而处于工作状态，用于滤除各种高频干扰信号。这就是为什么在电源电路中大电容出现时，总是并联着一个小电容的原因。

②两个大电容并联电路。采用两只相同电容的大电容并联主要是出于下列几个目的：

一是提高电路工作的可靠性，有一个电容器开路后，另一个电容器仍然能够使电路工作，这样可降低电路的故障发生率。

二是为了减小电容器的体积。一个电容大一倍的电容器其体积要大许多，由于机器内部空间的限制，只能装体积小的电容器，但电容又不够，此时可用两个电容较小的电容器相并联。

三是为了减小电容器漏电流。一个电容大一倍的电容器其漏电流要大许多，此时可用两个电容较小的电容器并联，并联后的总漏电流比用一个大电容的漏电流要小。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

四是为了加大电容，在采用一个大电容后的电路效果还不够理想时，再用一个大电容相并联。

③两个小电容并联电路。如图 1-46 所示是两个相等的小电容并联电路，在这种并联电路中，C_1 一般采用聚酯电容，属正温度系数电容器，C_2 一般采用聚丙烯电容，属负温度系数电容器。

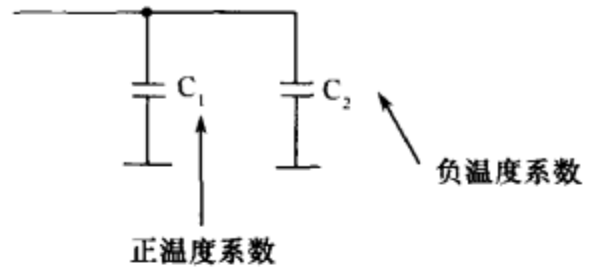


图 1-46　两个小电容并联

正温度系数的电容器的特性是，当温度升高时其电容增大，当温度下降时其电容减小。负温度系数的电容器的特性是，当温度升高时其电容减小，当温度下降时其电容增大。因此，若电路要求电容器的电容非常稳定时，可采用正、负温度系数的电容器并联接法。这种接法的总电容不受温度影响，因为当工作温度升高时，C_1 的电容增大，而 C_2 的电容减小，可见，两电容器并联的总电容 $C=C_1+C_2$ 基本不变。同理，在温度降低时，一个电容器的电容在减小而另一个在增大，总的电容也基本不变，达到稳定总电容的目的。

电容器的接法还有一些，这里不再一一分析。

第二章　电路基本定律

本章主要讨论欧姆定律、焦耳定律、基尔霍夫电流定律和电压定律，并对电路的有载状态、开路和短路作了分析和总结。这些内容是分析和计算电路的基础，也是电子产品设计与维修人员必备的基础知识。

第一节　欧姆定律和焦耳定律

一、部分电路欧姆定律

1. 部分电路欧姆定律定义式

导体中的用流，与导体两端的电压成正比，与导体的电阻成反比。这个结论是德国物理学家欧姆在 19 世纪经过大量实验得出的，叫做欧姆定律。

如果用 U 表示导体两端的电压，R 表示这段导体的电阻，I 表示这段导体中的电流，并且 U 的单位用伏，R 的单位用欧，I 的单位用安，那么，欧姆定律可以写成如下公式：

$$I=U/R$$

欧姆定律告诉我们，电路中的电流是怎样决定于电压和电阻的。它是关于电路的一条重要定律，在解决各种电路的实际问题中有广泛的应用。对于一段电路，只要知道电流、电压、电阻这三个物理量中的两个，就可以利用欧姆定律计算出第三个量。

如果分别用电压表和电流表测出电路中某一导体两端的电压和通过它的电流，就可以根据欧姆定律算出这个导体的电阻，这种用电压表和电流表测定电阻的方法叫做伏安法。

2. 几个公式的含义

公式 $I=U/R$ 是欧姆定律，公式 $U=IR$ 习惯上也称为欧姆定律。而公式 $R=U/I$ 是电阻的定义式，它表明了一种量度电阻的方法，绝不可以错误地认为“电阻跟电压成正比，跟电流成反比”，或认为“既然电阻是表示导体对电流的阻碍作用的物理量，所以导体中没有电流时导体就不存在电阻”。一定要明确公式的物理意义，不能不讲条件地说量与量之间的关系。

3. 导体的伏安特性

导体中电流 I 和电压 U 的关系可以用曲线来表示。用纵轴表示电流 I，用横轴表示电压 U，画出的 $I-U$ 曲线叫做导体的伏安特性曲线。在金属导体中，电流跟电压成正比，伏安特性曲线是通过坐标原点的直线，具有这种伏安特性的电学元件叫做线性元件，线性元件的伏安特性如图 2-1 所示。

4. 欧姆定律的适用范围

欧姆定律是在金属导体的基础上总结出来的，对其他导体是否适用，还需要经过实验

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

的检验。实验表明，除金属外，欧姆定律对电解液也适用，但对气态导体（如日光灯管中的气体）和某些导电器件（如晶体管）并不适用。对欧姆定律不适用的导体和器件，电流和电压不成正比，伏安特性曲线不是直线，这种电学元件叫做非线性元件。

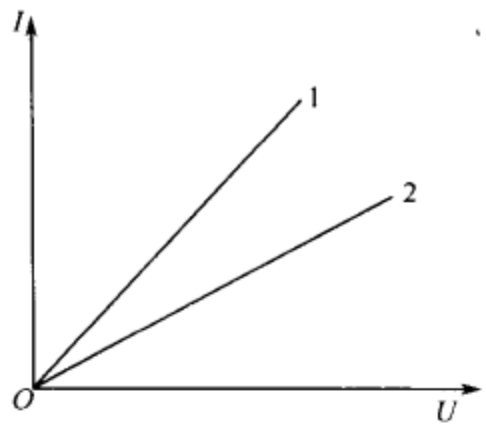


图 2-1　线性元件的伏安特性

5. 伏安法测电阻

伏安法测电阻的原理是部分电路的欧姆定律（$R=U/I$），测量电路可以有电流表外接和电流表内接两种方法，如图 2-2 所示。由于电压表和电流表内阻的存在，两种测量电路都存在着系统误差。

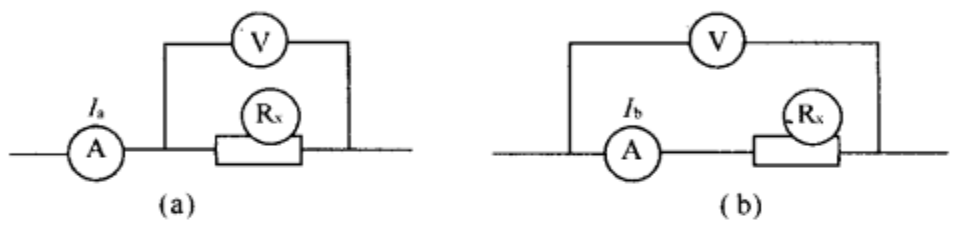


图 2-2　伏安法测量电阻

图 2-2(a)中，电流 I_a的测量值大于通过电阻 R_x上的电流，因此计算出的电阻值 R_a小于电阻 R_x的值。

$$R_a=\frac{U}{I_a}=\frac{R_V R_x}{R_V+R_x}<R_x$$

图 2-2(b)中，电压 U_b的测量值大于加在电阻 R_x上的电压，因此计算出的电阻值 R_b大于电阻 R_x的值。

$$R_b=\frac{U_b}{I}=R_A+R_x>R_x$$

为了减小测量误差，可先将待测电阻 R_x的粗略值与电压表和电流表的内阻值加以比较，当 $R_x \ll R_V$时，$R_X \approx R_V$。

$R_a=\dfrac{R_V R_x}{R_V+R_x}=\dfrac{R_X}{1+\dfrac{R_X}{R_V}} \approx R_X$，宜采用电流表外接法测量。

当 $R_x \gg R_A$时，$R_b=R_A+R_X \approx R_X$，宜采用电流表内接法测量。

二、焦耳定律

1. 焦耳定律定义式

英国物理学家焦耳经过大量的实验，于 1840 年最先精确地确定了电流产生的热量与电流、电阻和通电时间的关系：电流通过导体产生的热量与电流的二次方成正比，与导体的电阻成正比，与通电时间成正比，这个规律叫做焦耳定律。

焦耳定律可用以下公式表示：

$$Q=I^2Rt$$

公式中，若电流 I 的单位为安培，电阻 R 的单位为欧姆，通用时间 t 的单位为秒，则热

量 Q 的单位就是焦耳。

2. 电热的作用

电热器是利用电流通过导体电阻产生的热来加热的设备，电炉、电烙铁、电熨斗、电饭锅、电烤炉都是常见的电热器。电热器的主要组成部分是发热体。发热体是由电阻率大、熔点高的电阻丝绕在绝缘材料上做成的。电流通过电阻丝发出热量，供人们利用。电热器清洁卫生，没有环境污染，热效率高，有的还可以方便地控制和调节，这些都是电热器的优点。

电热也有消极的一面，要防止它造成危害。例如，在电动机里，电流所做的功主要用来做机械功，但电动机里的导线有电阻，会产生热量，使导线的温度升高。当温度超过绝缘材料的耐热温度时，绝缘材料会迅速老化，甚至可能烧坏，这就需要考虑如何加快散热。有的电动机里装有风扇，电动机的外壳作成散热片的形状(如图 2-3 所示)，都是为了加快散热。电视机的机壳上都有散热窗(如图 2-4 所示)，也是为了散热。

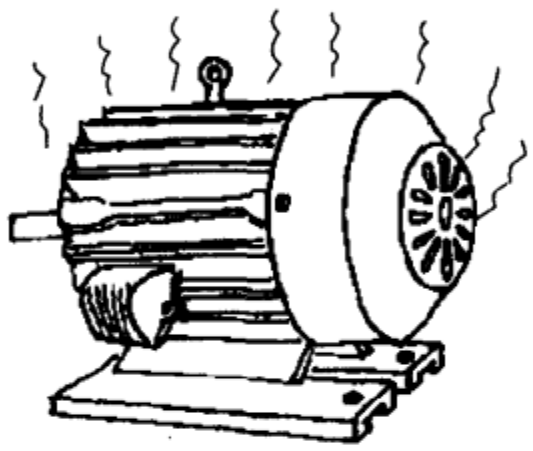


图 2-3　电动机的外壳

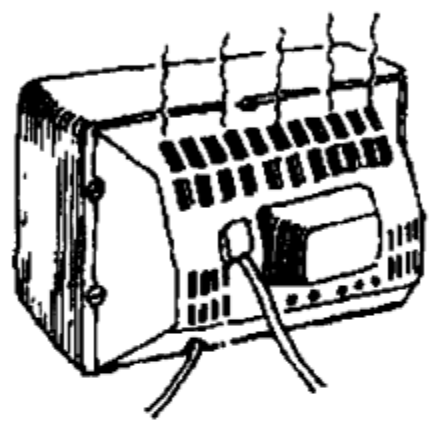


图 2-4　电视机的散热窗

3. 电热、电功、电功率的关系

表 2-1 列出了电热、电功、电功率各概念之间的区别与联系。

表 2-1　电热、电功、电功率的区别与联系

		电功 W	电热 Q	电功率 P
物理意义		电流通过电路时所做的功，即在电场力的作用下电荷定向移动所做的功	电流通过导体电阻时所产生的热	表征电流做功快慢的物理量，即电流的功与做功所用时间之比
能量转化情况		消耗电能转化为其他形式的能(如内能、机械能、化学能)	消耗电能只转化为内能	
表达式	任何电路	$W=qU=IUt$	$Q=I^2Rt$ (焦耳定律)	$P=\frac{W}{t}=IU$
	纯电阻电路	$W=IUt=I^2Rt=\frac{U^2}{R}t$		$P=IU=I^2R=\frac{U^2}{R}$

对于纯电阻电路，根据欧姆定律 $U=IR$，所以 $Q=I^2Rt=I\cdot IRt=IUt=W$，可见，纯电阻电路中，电流做的功完全转化为内能。对于非纯电阻电路，电能与其他形式能转化的关系非常关键。以电动机为例，设电动机两端电压为 U，通过电动机电流为 I，电动机线

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

圈电阻为 R，则电流做功或电动机消耗的总电能为 $W=IU$，电动机线圈电阻生热 $Q=I^2Rt$，电动机还对外做功，把电能转化为机械能，即 $W'=W-Q=IUt-I^2Rt$（W'是电动机输出的机械能）。

考虑每秒钟内能量转化关系，即功率，只要令上述各式中 $t=1s$ 即可，可得总功率 $P_{总}=IU$，电热功率 $P_{热}=I^2R_0$，如果输出功率为 $P_{出}$，则三者关系是：$P_{总}=P_{热}+P_{出}$。

根据以上分析，得出以下结论：在纯电阻电路中，电功等于电热，即 $W=Q$。对于非纯电阻电路，电功一定大于电热，从而为电路提供除内能之外的其他能量，电路中的能量关系为：$W=Q+W'$（W'为其他形式的能量，如机械能、化学能等）。

三、闭合电路欧姆定律

1. 闭合电路欧姆定律定义式

把电源接入电路，闭合电路中就有了电流，闭合电路可以看作是由两部分组成的：一部分是电源外部的电路，叫做外电路，外电路的电阻通常称为外电阻；另一部分是电源内部的电路，叫做内电路，电流通过内电路时，例如通过发电机线圈的导线或通过电池内部的溶液时，要受到阻碍作用，所以内电路也有电阻，内电路的电阻通常称为电源的内阻。如图 2-5 所示。

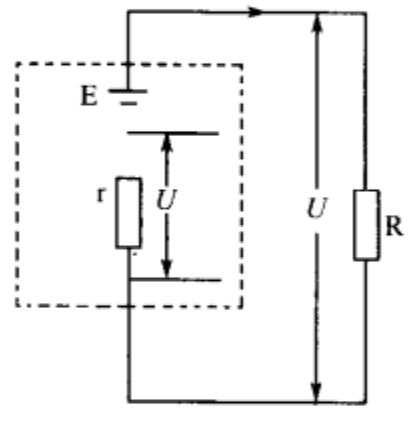


图 2-5　闭合电路

闭合电路中有电流通过时，在外电路和内电路中，电源提供的电能转化为其他形式的能量，设电路中有电流通过时电源提供的电能为 W，外电路中消耗的电能为 W_1，内电路中消耗的电能为 W_2，则由能量守恒定律可知：

$$W=W_1+W_2$$

设电路中通过的电流为 I，由电动势的定义可知，电源提供的电能 $W=EIt$。设外电路为电阻电路，外电阻为 R，由焦耳定律可知，外电路中消耗的电能 $W_1=I^2Rt$。设内阻为 r，由焦耳定律可知，内电路中消耗的电能 $W_2=I^2rt$。代入上式可得：

$$EIt=I^2Rt+I^2rt$$

消去 t，解出 I，可得

$$I=\frac{E}{R+r}$$

上式表示，闭合电路中的电流与电源的电动势成正比，与内、外电路中的电阻之和成反比。这个结论通常叫做闭合电路的欧姆定律。

2. 电动势与电路中电压的关系

电路中有电流通过时，电路的各部分都有电压，下面研究电源的电动势与电路各部分电压的关系。

根据闭合电路欧姆定律 $I=\frac{E}{R+r}$ 可得：

$$E=IR+Ir$$

设外电路两端的电压为 U，内电路的电压为 U'，由部分电路欧姆定律知：

$$U=IR,U'=Ir$$

因此，$E=IR+Ir$ 可以写成

$$E=U+U'$$

外电路两端的电压通常称为外电压，外电压也叫路端电压（简称端电压），内电路的电压通常称为内电压。$E=U+U'$ 表示，电源的电动势等于外电压和内电压之和。若不考虑电源内阻 r，则电源电动势在数值上与它的路端电压相等，但实际方向相反。为便于读者对电动势和路端电压有一个全面的认识，表 2-2 列出了它们之间的区别。

表 2-2　电动势和路端电压对照表

	电动势 E	路端电压 U
物理意义	反映电源内部非静电力做功把其他形式的能量转化为电能的情况	反映电路中电场力做功把电能转化为其他形式能量的情况
定义式	$E=\frac{W}{q}$ W 为电源的非静电力把正电荷从电源内由负极移到正极所做的功	$U=\frac{W}{q}$ W 为电场力把正电荷从电源外部由正极移到负极所做的功
量度式	$E=IR+Ir=U+U'$	$U=IR$
测量	运用欧姆定律间接测量	用伏特表测量
决定因素	只与电源的性质有关	与电源和电路中的用电器有关
特殊情况	当电源开路时，路端电压 U 值等于电源电动势 E	

3. 路端电压 U 随外电阻 R 变化的规律

电源的电动势和内电阻是由电源本身的性质决定的，不随外电路电阻的变化而变化，而电流、路端电压是随着外电路电阻的变化而变化的。

根据 $I=\frac{E}{R+r}$ 和 $U=E-Ir$ 可知：

路端电压 U 随外电阻 R 增大而增大，随外电阻 R 减小而减小。

当 $R\to\infty$（无穷大）时，$r/R\to 0$，外电路可视为断路，$I\to 0$，此时 $U=E$，即当外电路断开时，用电压表直接测量电源两极电压，数值等于电源的电动势。

当 R 减小为 0 时，电路可视为短路，$I=E/r$ 为短路电流，路端电压 $U=0$。可见，发生短路时，电流不但取决于电动势 E，还取决于电源的内电阻 r，而电源的内电阻 r 一般比较小，则短路时电流过大，不仅会烧坏电源，还会引起火灾。

电路的路端电压 U 与电流 I 的关系如图 2-6 所示。

4. 电源的输出功率 P 随外电阻 R 变化的规律

在纯电阻电路中，当用一个固定的电源（设 E、r 是定值）向变化的外电阻供电时，输出的功率 $P=IU=I^2R$

又因为 $I=\frac{E}{R+r}$，所以

$$P=\left(\frac{E}{R+r}\right)^2R=\frac{E^2R}{R^2+2Rr+r^2}=\frac{E^2R}{(R-r)^2+4Rr}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

当 $R=r$ 时，电源有最大的输出功率 $P_m=E^2/4r$。

据此，可以画出输出功率 P 随外电阻 R 变化的曲线，如图 2-7 所示。

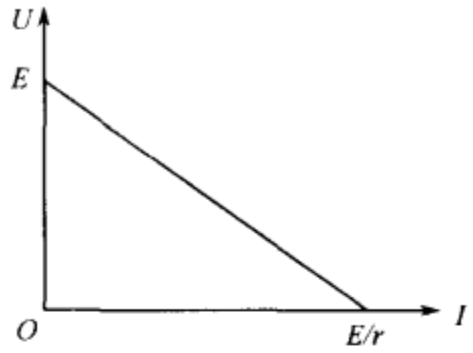


图 2-6　电路的路端电压 U 与电流 I 的关系

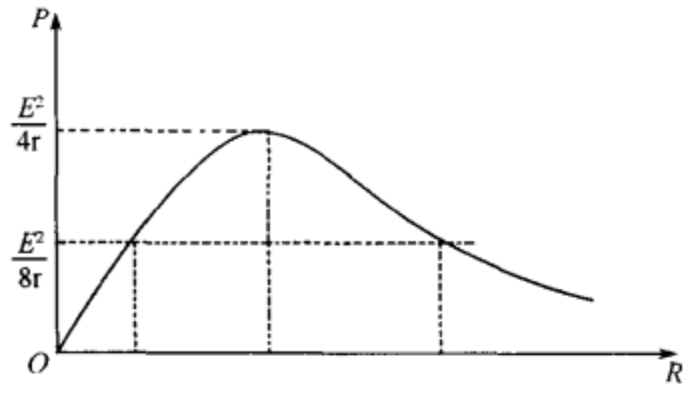


图 2-7　输出功率 P 随外电阻 R 变化的曲线

可见，在纯电阻电路中，当用一个固定的电源（即 E、r 是定值）向变化的外电阻供电时，输出的功率有最大值。当输出功率最大时，电源的效率是否也最大呢？下面简要分析。

在电路中电源的总功率为 IE，输出的功率为 IU，则电源的效率为：

$$\eta=IU/IE=U/E=R/(R+r)$$

当 R 变大，η 也变大，而当 $R=r$ 时，即输出功率最大时，电源的效率 $\eta=50\%$。由此说明，当输出功率最大时，电源效率不是最大。

例 1：如图 2-8 所示电路，滑动变阻器的总电阻 $R=6\Omega$，定值电阻 $R_1=1\Omega$，$R_2=3\Omega$。当滑片 P 在 a 端时，电压表的示数是 3V；当滑片 P 在 b 端时，电压表的示数是 2V。求电源电动势 E 及内电阻 r。

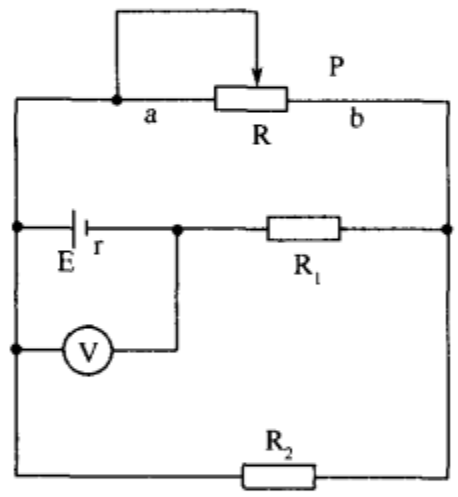


图 2-8　例 1 电路图

解：当滑片 P 在 a 端时，滑动变阻器的有效电阻为 $R=6\Omega$，这时变阻器 R 与电阻 R_2 并联后再与电阻 R_1 串联，此时外电阻

$$R_{外1}=R_1+\frac{RR_2}{R+R_2}=1+\frac{6\times3}{6+3}=3(\Omega)$$

此时干路电流

$$I_{干1}=\frac{U_1}{R_{外1}}=\frac{3}{3}=1(\mathrm{A})$$

从而有

$$E=3+r \tag{2-1}$$

当滑片 P 在 b 端时，滑动变阻器的有效电阻 $R=0$，则外电阻

$$R_{外2}=R_1=1\Omega$$

此时干路电流

$$I_{干2}=\frac{U_2}{R_{外2}}=\frac{2}{1}=2(\mathrm{A})$$

从而有

$$E=2+2r \tag{2-2}$$

由式(2-1)式、式(2-2)得：$3+r=2+2r$

解得　$r=1\Omega, E=(3+1)=4(\mathrm{V})$

第二节　基尔霍夫电流和电压定律

分析与计算电路的基本定律，除了欧姆定律之外，还有基尔霍夫电流定律(英文为 Kirchhoff's Current Law，缩写是 KCL)和基尔霍夫电压定律(英文为 Kirchhoff's Voltage Law，缩写是 KVL)。基尔霍夫电流定律应用于结点，基尔霍夫电压定律应用于回路。

一、支路、结点、回路和网孔

在讨论基尔霍夫电流定律和电压定律之前，先介绍几个电路名词，有关电路如图 2-9 所示。电路中，U_1、U_2 为电压源。

1. 支路

电路中，含有电路元件的每个分支称为支路，一条支路中通过的电流为同一电流。在图 2-9 中，有三条支路，即 acb、adb 和 R_L 支路，在支路 acb、adb 中含有电源，这些支路称为有源支路，而电阻 R_L 支路中不含电源，称为无源支路。

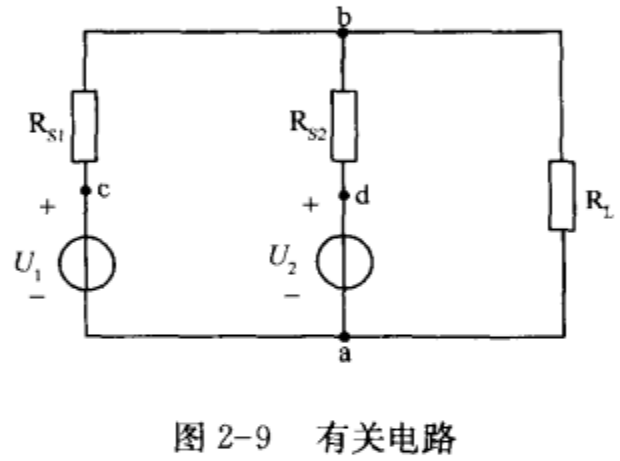


图 2-9　有关电路

2. 结点

电路中，三条或三条以上支路的联结点称为结点，图 2-9 电路中有两个结点 a 和 b，而 c、d 则不能被看作结点。

3. 回路

电路中，由几条支路组成的闭合电路称为回路，图 2-9 中，共有三条回路，即 acbda、adbR_La 和 acbR_La。

4. 网孔

在回路内部，没有被支路分割，这样的回路称为独立回路，又称为网孔。在图 2-9 所示的电路中，acbda、adbR_La 回路都是网孔。

二、基尔霍夫电流定律

1. 基尔霍夫电流定律表达式

基尔霍夫电流定律用于确定一个结点上各支路电流之间的关系。由于电流的连续性，在电路中任何点(包括结点在内)的截面上，均不能堆积电荷。因此，基尔霍夫电流定律内容如下：

电路中任一瞬间，流出任一结点电流之和等于流入结点的电流之和。即

$$\sum I_{入} = \sum I_{出}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

将上式改写成$\sum I_{入} - \sum I_{出} = 0$，即

$$\sum I = 0$$

就是在一瞬间，结点上电流代数和恒等于零。如果规定流入结点的电流为正，则流出结点的电流为负。

2. 应用 KCL 列方程式的步骤

①选定结点。

②标出各支路电流参考方向。

③针对结点应用 KCL 列方程。

④解 KCL 方程。

例如，对于图 2-10 所示电路，选定节点 a，标出电流参考方向如图所示，根据基尔霍夫电流定律，则有 $I_G + I_B = I_L$或 $I_G + I_B - I_L = 0$。

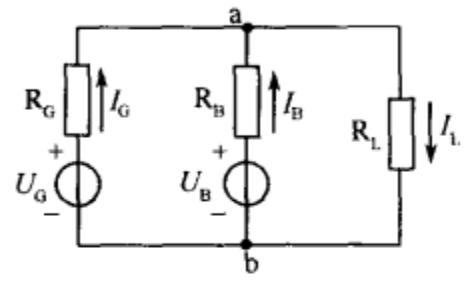


图 2-10　电路举例

3. 基尔霍夫电流定律的推广

基尔霍夫电流定律不仅适用于电路中任一结点，而且还适用于电路中任一闭合面，该闭合面称为广义结点。如图 2-11 所示电路，封闭面包含的是一个三角形电路，它有 A、B、C 三个结点，应用基尔霍夫电流定律可列出：

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}, I_B = I_{BC} - I_{AB}, I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

将以上三式相加，可得 $I_A + I_B + I_C = 0$，即 $\sum I = 0$。

三、基尔霍夫电压定律

1. 基尔霍夫电压定律表达式

基尔霍夫电压定律用于确定回路中各部分电压之间的关系。其内容如下：

在任一瞬间，对于电路中任一回路，沿任一指定方向（顺时针或逆时针）绕行一周，各部分电压的代数和恒等于零。即

$$\sum U = 0$$

2. 应用 KVL 列方程的步骤

①选定回路，标出回路绕行方向。

②标出各支路电流、电压源的参考方向。

③对回路应用 KVL 列方程。

在 KVL 方程式中，若规定电流参考方向与回路绕行方向一致取“+”号，则不一致时取“−”号。若规定电压或电动势上升取“+”号，则电压或电动势下降取“−”号。

例如：图 2-12 所示电路，选定了两个回路，并标出了回路的方向。

对于回路Ⅰ，根据基尔霍夫电压定律，可列出方程

$$U_1 - R_1 I_1 - R_2 I_2 - U_2 = 0$$

在回路Ⅰ中，规定电流与绕行方向一致取正，I_1 和 I_2 由于均与绕行方向一致，因此，取正号。

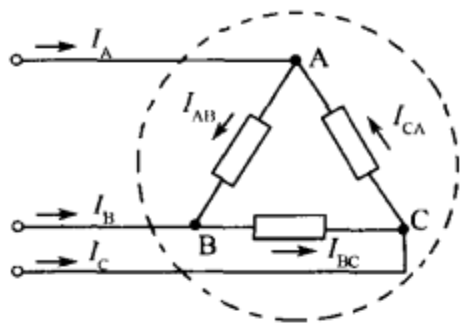


图 2-11　闭合面电路

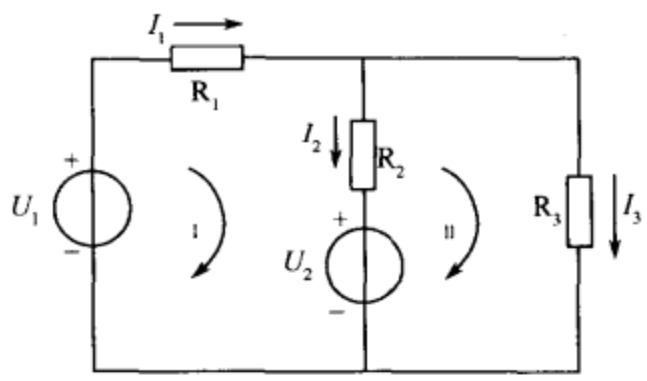


图 2-12　KVL 电路

在回路Ⅰ的绕行方向上，规定电压上升为正，U_1 电压上升，U_1 取正，而 U_2 电压下降，因此 U_2 取负。

对于回路Ⅱ，根据基尔霍夫电压定律，可列出方程

$$U_2-R_2\times(-I_2)-R_3I_3=0$$

在回路Ⅱ中，电流 I_3 与绕行方向一致，因此取正号，而电流 I_2 与绕行方向相反，因此取负号。

在回路Ⅱ的绕行方向上，U_2 电压上升，因此 U_2 取正。

3. 基尔霍夫电压定律的推广

基尔霍夫电压定律可推广应用于任何一个开口电路。

对于图 2-13 所示的开口电路，求开口电压时，可按以下方法进行：

①标出开口电压 U_{ab} 的参考方向。

②假想 U_{ab} 与支路 ab 组成一个闭合电路，画出电路绕行方向，取电压上升为正，电压下降为负。

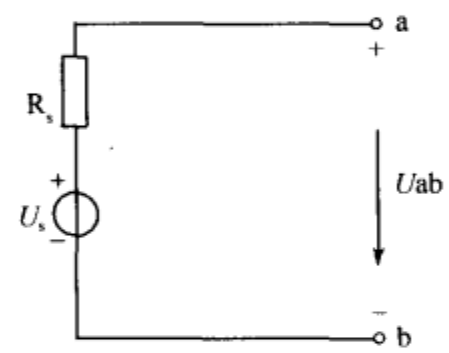


图 2-13　开口电路

③利用 KVL 列方程。

$$U_S-IR_S-U_{ab}=0$$

即

$$U_{ab}=U_S-IR_S$$

第三节　电路中电位的计算

在电路分析中，特别是分析晶体管工作状态时，通常使用电位的概念来讨论问题。为了求得电路中各点的电位值，必须在电路中选择一个参考点，并且规定参考点的电位为零，这个参考点常称为零电位点。原则上零电位点是可以任意指定的，在实际工程中，常常指定大地为零电位参考点。这是因为有些设备的机壳大都是与地面相连接的。但是，在许多电子仪器设备中，它们的外壳一般是不与大地连接的。为了分析方便，把电路中很多元件汇集在一起的一个公共点假设为参考点，参考点在电路中一般标上“接地”符号。

电路中的参考点选定以后，电路中某点的电位就等于该点与参考点之间的电压，这样电路中各点电位就有了一个确定数值，高于参考点的电位为正；低于参考点的电位为负。电路中各点的电位一旦确定以后，就可以求得任意两点之间的电压。

例 2：图 2-14 所示电路中，b 点为参考点，求 a、c、d 三点的电位。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

解：根据电路图可知，$U_b=0$

$$U_a=U_{ab}=6\times10=60(\text{V})$$

$$U_c=U_{cb}=140(\text{V})$$

$$U_d=U_{db}=90(\text{V})$$

从上面结果可以看出，电路中某一点的电位等于该点与参考点（电位为 0）之间的电压值。需要说明的是，参考点选择不同，电路中各点的电位随着改变，但是，任意两点之间的电压是不变的，所以，各点电位的高低是相对的，而电压值是绝对的。

图 2-14 也可简化为图 2-15 所示的电路，不画电源，各端标以电位值。

例 3：计算图 2-16 所示电路中 B 点的电位。

解：电路中的电流为

$$I=\frac{U_a-U_c}{R_1+R_2}=\frac{6-(-9)}{100+50}=\frac{15}{150}=0.1(\text{mA})$$

$$U_{ab}=U_a-U_b=IR_2$$

$$U_b=U_a-IR_2=6-0.1\times50=1(\text{V})$$

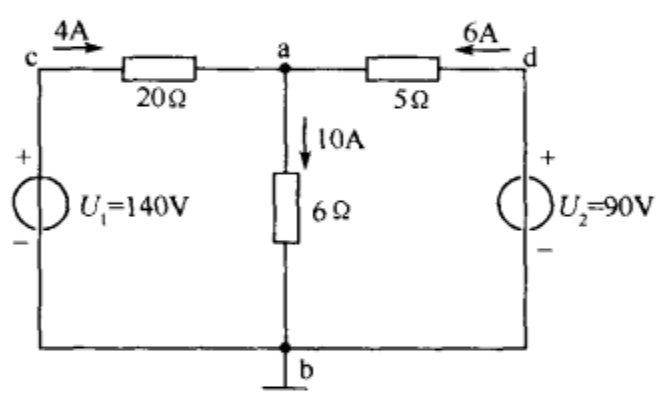


图 2-14　例 2 电路图

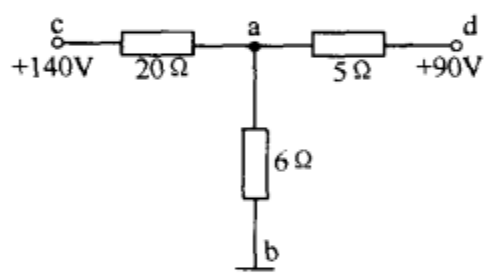


图 2-15　简化电路图

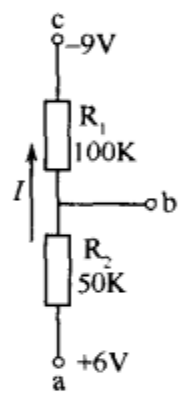


图 2-16　例 3 电路图

第三章　电路的等效变换

本章首先分析了电阻电路等效变换方法，然后介绍了电压源和电流源，对电压源和电流源的等效变换作了详细论述，最后简要介绍了受控源的基本原理。了解和掌握这些内容对分析复杂电路具有重要指导作用。

第一节　电阻电路的等效变换

电阻电路的联结主要有串联、并联和混联。对于串联和并联，可用电阻的串并联公式进行化简和计算。在实际电路中，比较难处理的是电阻的混联电路，如果不能画出电阻电路的等效电路图，就难以求出等效电阻。为此，下面介绍一种求等效电阻的方法。

一、根据等势点画等效电路图

根据等势点画等效电路图的方法如下：

①标出等势点。依次找出各个等势点，并从高电势点到低电势点顺次标清各等势点字母。

②结合等势点画草图。即把几个电势相同的等势点拉到一起，合为一点，然后假想提起该点“抖动”一下，以理顺从该点向下一个节点电流方向相同的电阻，这样逐点依次画出草图。画图时要注意标出每个等势点处电流“兵分几路”及与下一个节点的联结关系。

③整理电路图。要注意等势点、电阻序号与原图一一对应，整理后的等效电路图力求规范，以便计算。

例 1：图 3-1 所示电路中，$R_1=R_2=R_3=3\Omega$，$R_4=R_5=R_6=6\Omega$，求 E、F 两点间的电阻。

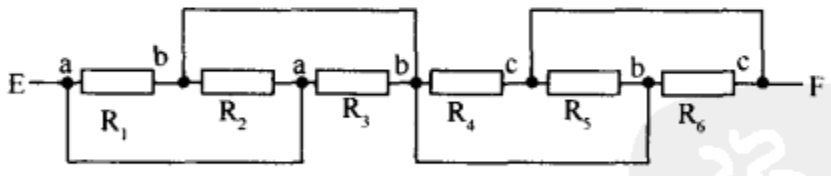


图 3-1　例 1 电路

解：该题是一种典型的混联电路，虽然看上去对称、简单，但直接看是很难认识各个电阻间的连接关系的，因此必须画出等效电路图。

在原电路图上标出等势点 a、b、c。

结合等势点画等效电路图。从高电势点 E 点开始，先把两个 a 点捏合到一起，理顺电阻，标出电流在 a 点的去向，即分别经 R_1、R_2、R_3 流向 b 点；再捏合三个 b 点，理顺电阻，标出电流在 b 点的去向，即分别经 R_4、R_5、R_6 流向 c 点；最后捏合 c 点，电流流至 F 点。如图 3-2 所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

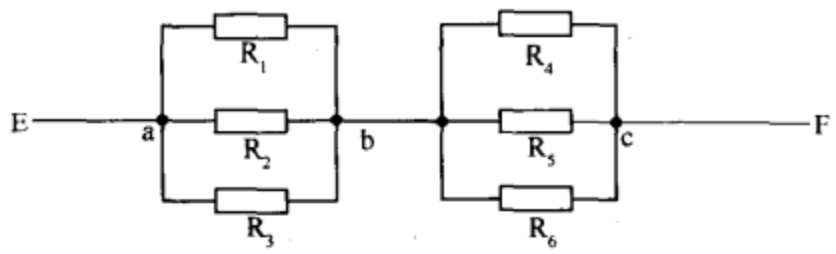


图 3-2　等效电路

从等效电路图可以清楚地看出，原电路中 R_1、R_2、R_3 并联，R_4、R_5、R_6 并联，然后二者再串联，很容易计算出 E、F 两点间的电阻 $R=3\Omega$。

例 2：如图 3-3 所示电路，$R_1=R_3=4\Omega$，$R_2=R_5=1\Omega$，$R_4=R_6=R_7=2\Omega$，求 a、d 两点间的电阻。

解：在原电路图上标出等势点 a、b、c、d。

捏合等势点画等效电路图，首先捏合等势点 a，从 a 点开始，电流分为三路，分别经 R_2 流向 b 点，经 R_3 和 R_1 流向 d 点；捏合等势点 b，电流分为两路，分别经 R_5 流向 c 点，经 R_4 流向 d 点；捏合等势点 c，电流分为两路，分别经 R_6 和 R_7 流向 d 点。根据以上分析，画出等效图如图 3-4 所示。

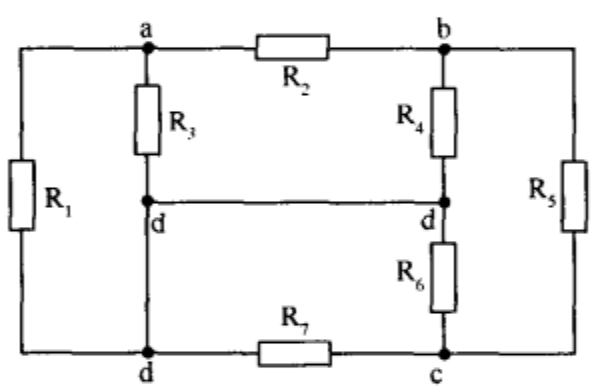


图 3-3　例 2 电路图

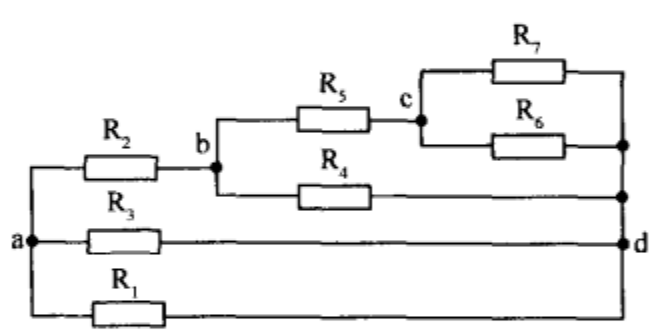


图 3-4　等效电路图

从等效电路图可以看出，原电路各电阻的联结关系，很容易计算出 a、d 两点间的电阻 $R=1\Omega$。

例 3：如图 3-5 所示的电路，$R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=30\Omega$，求 ab 间的电阻。

解：在原电路图上标出等势点 a、b、c。

结合等势点画等效电路图。从高电势点 a 点开始理顺电阻，标出电流在 a 点的去向，即分别经 R_1、R_2 流向 b 点，分别经 R_4、R_3 流向 c 点；再捏合 c 点理顺电阻，标出电流在 c 点的去向，即经 R_5 流向 b 点，因此，画出等效电路如图 3-6 所示。

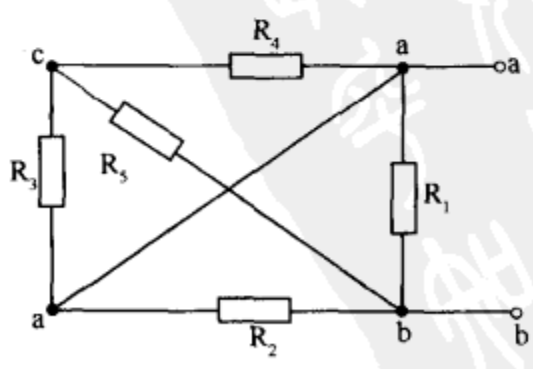


图 3-5　例 3 电路图

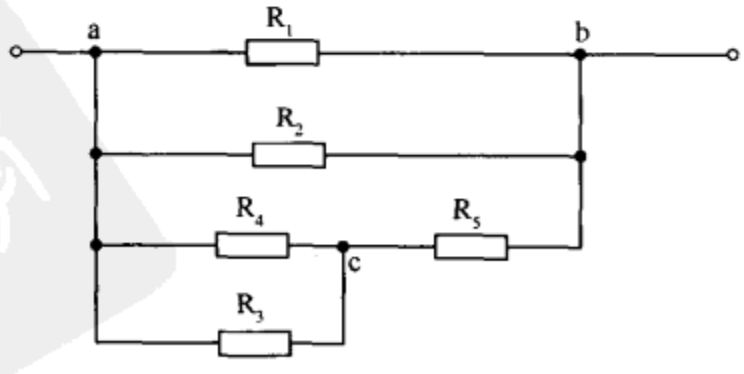


图 3-6　等效电路

从等效电路图可以清楚地看出原电路中 R_3、R_4 并联后和 R_5 串联，最后，再和 R_1、R_2 并联。很容易计算出 ab 两点间的电阻 $R=11.25\Omega$。

二、对称电路的等效电阻求法

对称电路是指在电路结构上，以某一直线为对称轴上下对称或左右对称。所谓对称，是指不仅形式相同，而且电阻值也相同。对称电路具有以下特点：一是对称结点的电位相等；二是对称支路上的电流分布相同。

根据对称电路的特点，求对称电路的等效电阻时可按以下方法进行。

1. 折叠法

以电路的对称轴为折叠线，将电路的上(右)半部分折过来，与下(左)半部分重叠，使对应的结点重合，电路可简化一半。

例 4：如图 3-7 所示的电路中，各电阻均为 3Ω，求 AB 端的输入电阻。

解：从电路图中可以看出，本电路图以 AOB 为对称轴上下对称，显然，结点 C 与 D，结点 E 与 F 为同电位点。

将电路图的下半部分以 AOB 为折叠线，折到上面，使结点 C 与 D，E 与 F 重合，如图 3-8 所示。

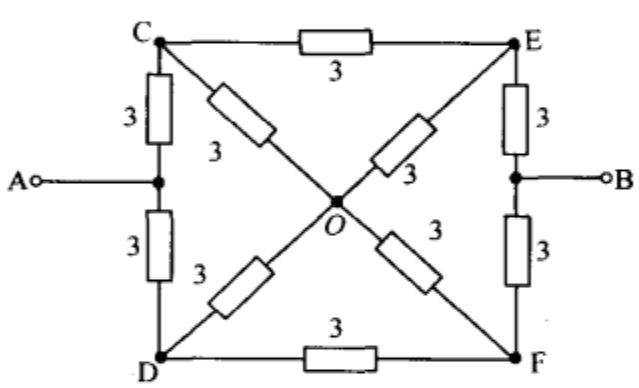


图 3-7　例 4 电路

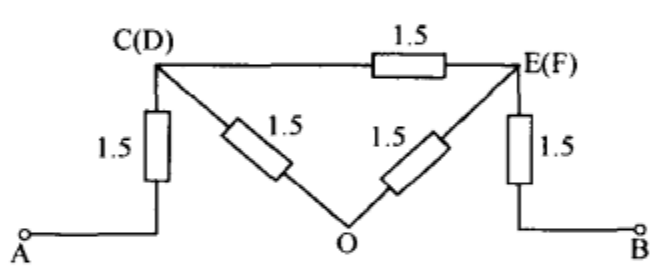


图 3-8　等效电路

由于各支路均为两个电阻并联，故可用阻值为 1.5Ω 的电阻代换它们。由此可得到 AB 间的输入电阻为：

$$R_{AB}=1.5+1.5//(1.5+1.5)+1.5\text{(式中的“//”表示并联)}$$

即

$$R_{AB}=4\Omega$$

2. 短路法

相同电位的两结点之间的电位差为零，从电位角度来看，可以将两结点支路视为短路，故可用短路线将两结点联结起来，电路便减少一个结点。

例 5：电路图如图 3-7 所示，求 AB 间的输入电阻。

解：由电路的对称性可知，结点 C 与 D，E 与 F 为同电位结点，用短路线将 CD、EF 短路，这样并不改变电路各结点的电位和各支路电流分布，如图 3-9 所示。

从等效电路图中可以看出，支路 AC 与 AD，CO 与 DO，OE 与 OF，EB 与 FB 都为并联关系，经改画后，等效为图 3-10 所示电路。

从图中不难看出各电阻之间的串并联关系，因此 $R_{AB}=4\Omega$。

3. 断开法

位于对称轴上的结点具有特殊的性质，可以将联结该结点的对称支路与其断开。因

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

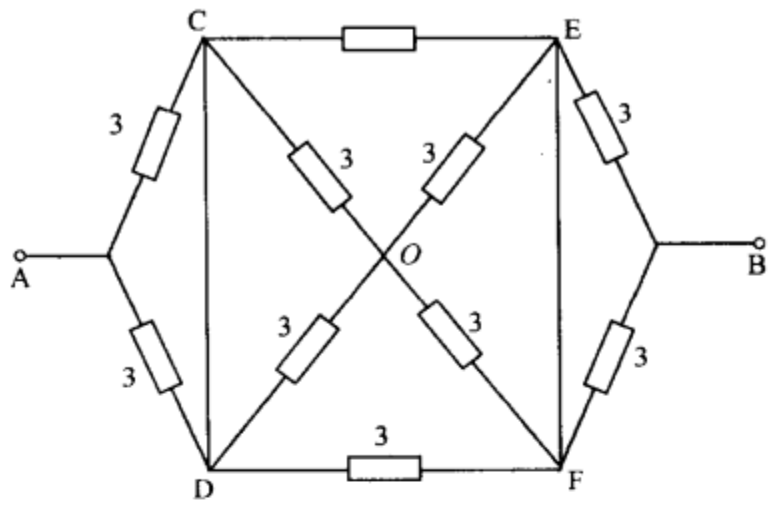


图 3-9　等效电路

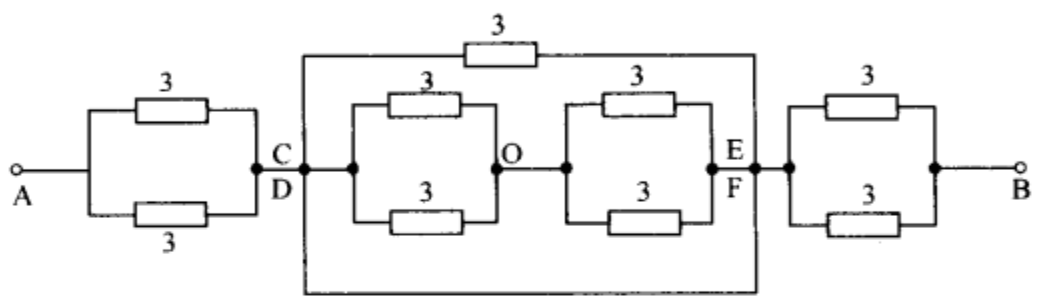


图 3-10　化简后的电路

此，这种计算电阻的方法称为断开法。

例 6：电路图如图 3-7 所示，求 AB 间的输入电阻。

解：在对称轴的结点 O 处，把支路 COE、DOF 断开，如图 3-11 所示。点 O′、O″为对称点，即为同电位点，这样做并不改变电路各结点电位和各支路上电流的分布。

从图中可以清楚地看出各电阻的串并联关系，因此，$R_{AB}=4\Omega$。

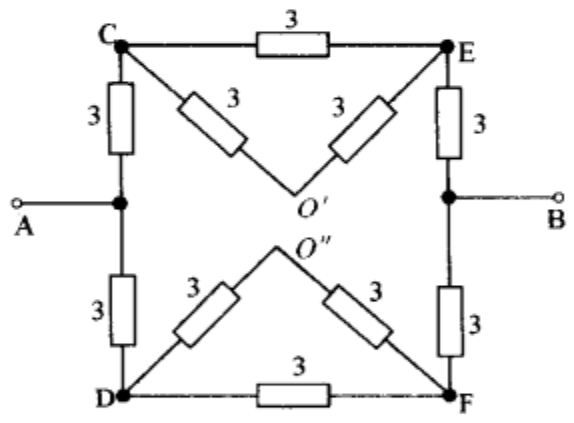


图 3-11　等效电路图

方法技巧：有时会遇到某些电路，其部分电路具有对称性，这时，就需要设法使另一部分也具有对称性，这样一来，整个电路便完全对称，就可以利用上述三种方法之一来求解。将不对称的电路变为对称的电路通常的方法是利用串并联等效电阻变换。如一个阻值为 R 的电阻，可以用两个阻值为 $1/2R$ 的串联电阻来代替它，也可以用两个阻值为 $2R$ 的并联电阻来代替它。需要说明的是，电位相等的两个结点，从电流角度来看，两结点支路上的电流为零，故可以将该支路视为开路。

例 7：电路如图 3-12 所示，试求 AB 端的输入电阻。

解：本题具有部分对称性，将 AB 支路的 6Ω 电阻用两只串联的 3Ω 电阻代替，将 CD 支路的 1Ω 电阻用两只并联的 2Ω 电阻代替，则电路以 CDE 为轴完全对称，如图 3-13 所示。

显然，图中 C、D、E 为同电位点，故 CD 支路可视为短路，如图 3-14 所示。

从图中可得 AB 间的输入电阻为

$$R_{AB}=6//(1+1)//(6+6)=6//2//12=1\frac{1}{3}(\Omega)$$

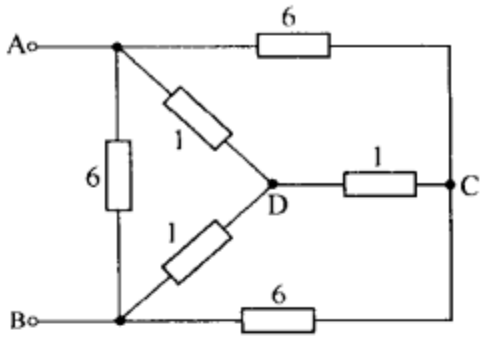


图 3-12　例 7 电路图

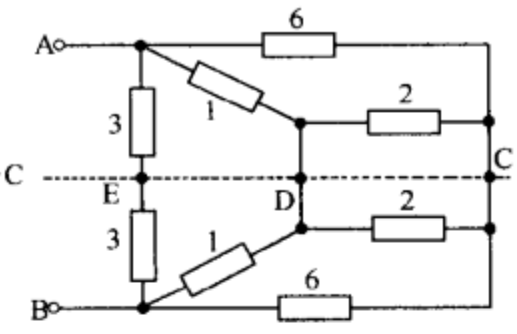


图 3-13　等效电路

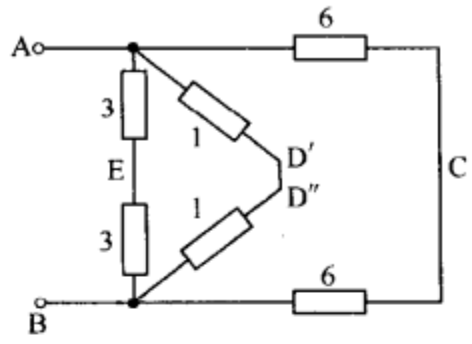


图 3-14　简化电路

三、惠斯通电桥及其应用

将电阻 R_1、R_2、R_3、R_4 和内阻为 R_5 的检流计连成电桥电路，如图 3-15 所示。

上述电路一般称为惠斯通电桥，它有四个桥臂（R_1、R_2、R_3、R_4），当电桥四个臂的电阻乘积相等时，即 $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ 时，检流计的指示为零，电桥的这种状态称为平衡状态，$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ 称为电桥的平衡条件。

当电桥处于平衡状态时，因为 CD 支路的检测计电流为零，所以结点 C、D 的电位相等，即 C、D 为同电位结点，此时可用一根短路线将 C、D 两结点连接起来，如图 3-16 所示。这样的变换并不改变原电路中各结点的电位和各支路电流的分布。

从图 3-16 中可以求出 AB 间的输入电阻 $R_{AB} = R_1 // R_2 + R_3 // R_4$，即

$$R_{AB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$$

另外，当电桥平衡时，因为 CD 支路的检测计电流为零，可认为 CD 支路为开路，如图 3-17 所示。

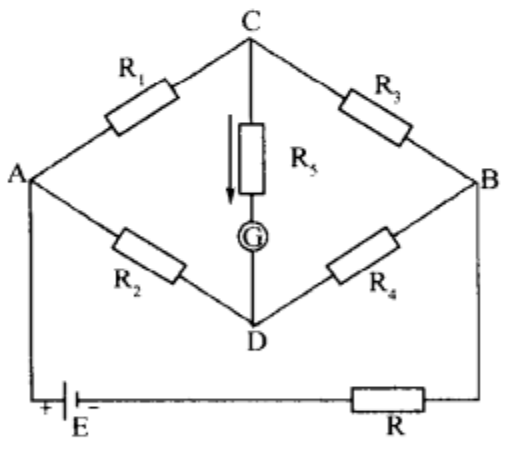


图 3-15　电桥电路

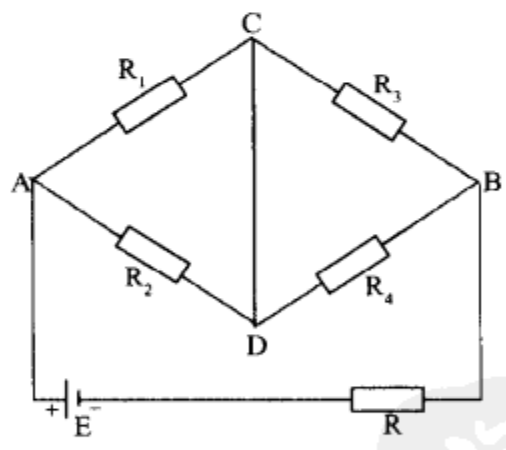


图 3-16　电桥平衡时的等效电路 1

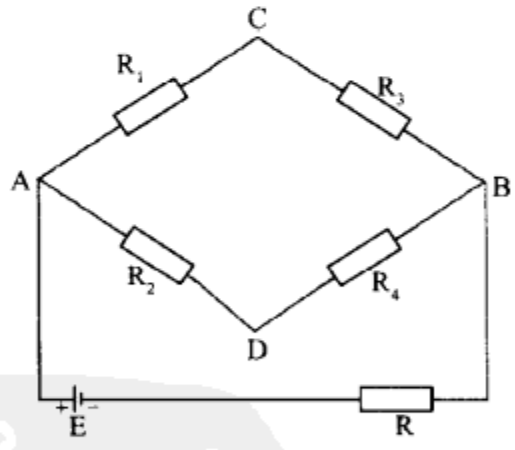


图 3-17　电路平衡时的等效电路 2

这样的变换也不改变电路中各结点电位和各支路电流的分布，此时 AB 间的输入电阻 $R_{AB} = (R_1 + R_3) // (R_2 + R_4)$，即

$$R_{AB} = \frac{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_4 + R_2 R_3 + R_3 R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

由于电桥平衡时 $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$，经过整理后便得

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$R_{AB}=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}+\frac{R_3R_4}{R_3R_4}$$

从以上分析可知：在电桥处于平衡状态时，将同电位两结点短路，可使原电路减少一个结点；将同电位两个结点开路，可使原电路减少一个回路。这两种方法都有利于电路的简化，使用哪种方法要根据具体电路而定。如果电桥不满足平衡条件，则不能采取以上方法求 AB 间的等效电阻。

例 8：试求图 3-18 所示电路中 AB 间的输入电阻。

解：将电路改画为如图 3-19 所示，可见这是一个电桥电路，因 $10\times15=5\times30$，所以电桥处于平衡状态。

因电桥处于平衡状态，所以，可将 C、D 支路断开，如图 3-20 所示。

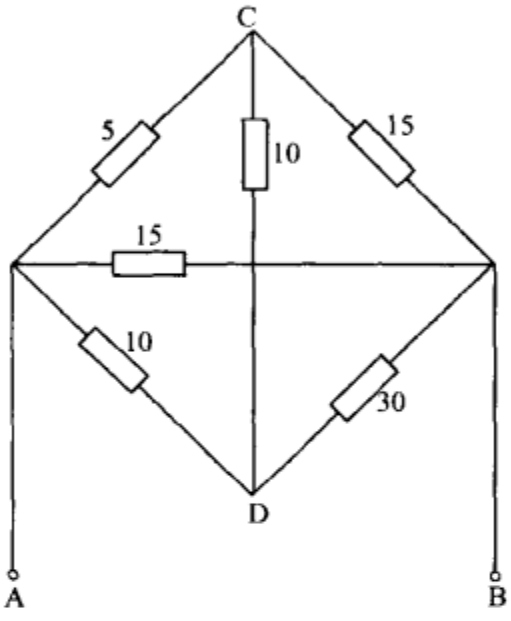


图 3-18　例 8 电路图

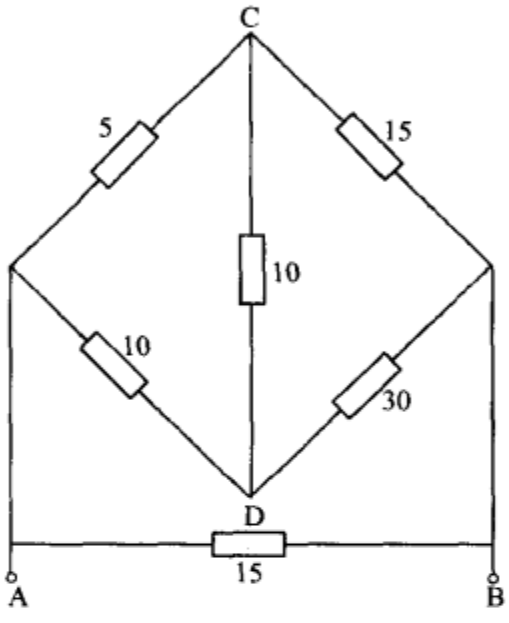


图 3-19　改画后的电路图

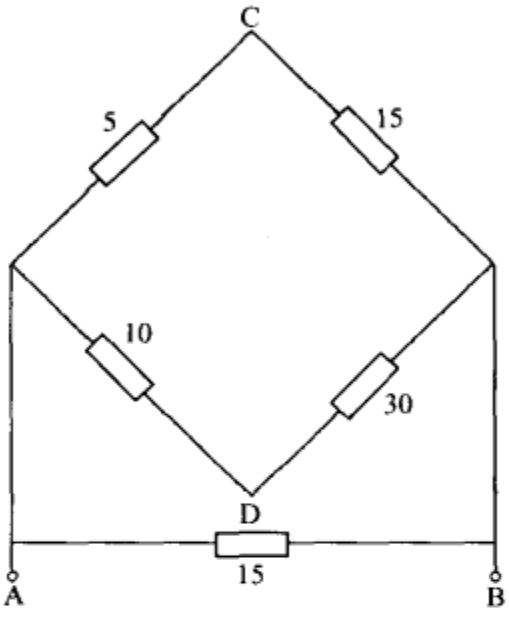


图 3-20　等效电路

从图 3-20 中可以清楚地看出各电阻之间的串并联关系，因此

$$R_{AB}=[(5+15)//(10+30)]//15=$$

$$(20//40)//15=$$

$$\frac{120}{17}(\Omega)$$

四、外加电源法求等效电阻

不含电源的电阻电路又称无源二端网络，求无源二端网络的输入电阻时，可在图 3-21所示的电路中的 AB 端施加电压为 V 的直流电压，根据基尔霍夫电流和电压定律，列出方程，求出电流 I，则 AB 间的输入电阻为

$$R_{AB}=\frac{V}{I}$$

V 的数值原则上是任意选取的，为了计算方便，最好选整数，数值不要太大或太小。

例 9： 如图 3-22 所示电路，求 AB 间的输入电阻。

解：在 AB 端施加电压为 10V 的直流电源，设各支路的电流分别为 I_1、I_2、I_3、I_4，如图 3-23 所示。

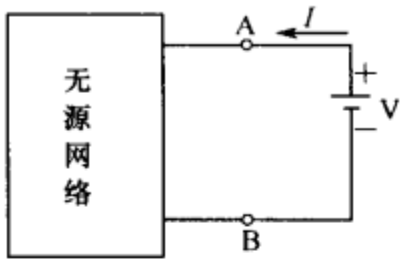


图 3-21　电阻电路施加直流电压

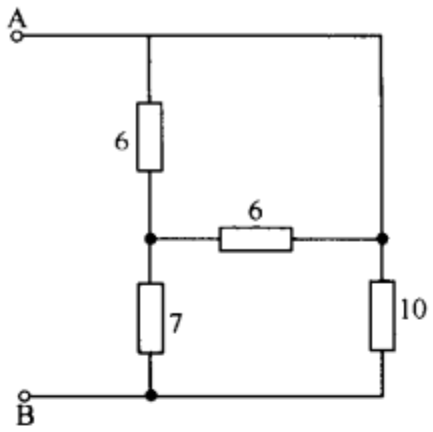


图 3-22　例 9 电路图

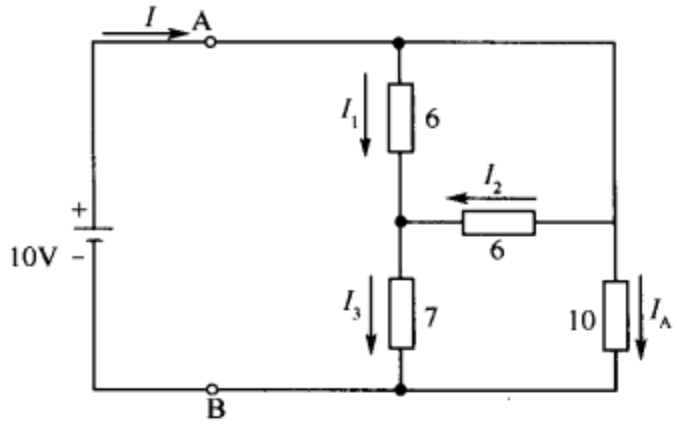


图 3-23　施加直流电压后的电路图

根据电路结构和基尔霍夫电流定律可得

$$I_1=I_2$$

$$I_3=I_1+I_2$$

$$I=I_1+I_2+I_4$$

根据电路结构和基尔霍夫电压定律可得

$$V=6I_1+7I_3=$$

$$6I_1+7(I_1+I_2)=$$

$$6I_1+14I_1=$$

$$20I_1$$

即 $10=20I_1$，所以

$$I_1=10/20=0.5(A)$$

$$I_4=10/10=1(A)$$

$$I=I_1+I_2+I_4=0.5+0.5+1=2(A)$$

因此，AB 间的输入电阻为

$$R_{AB}=\frac{V}{I}=10/2=5(\Omega)$$

＊五、电阻△形联结和 Y 形联结等效变换

1. △形联结和 Y 形联结

将三个电阻 R_{ab}、R_{bc}、R_{ca} 按图 3-24(a)、(b)所示联结成三角形或 π 形，称为△形(三角形)联结或 π 形联结。R_{ab}、R_{bc}、R_{ca} 称为△形联结的三个臂。

将三个电阻 R_{ab}、R_{bc}、R_{ca} 按图 3-24(c)、(d)所示联结成星形，称为 Y 形(星形)联结或 T 形联结。R_{ab}、R_{bc}、R_{ca} 称为 Y 形联结的三个臂。

2. 电阻△形联结和 Y 形联结的等效变换

在有些电路中，△形联结或 Y 形联结的电路不能直接用电阻串并联的形式化简。但是，若能将△形电路转换成等值的 Y 形电路，如图 3-25(a)，或将 Y 形电路转换为等值的△形电路，如图 3-25(b)，就能利用电阻串并联的方法进行计算。因此，有必要研究两者之间的等值互换规律。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

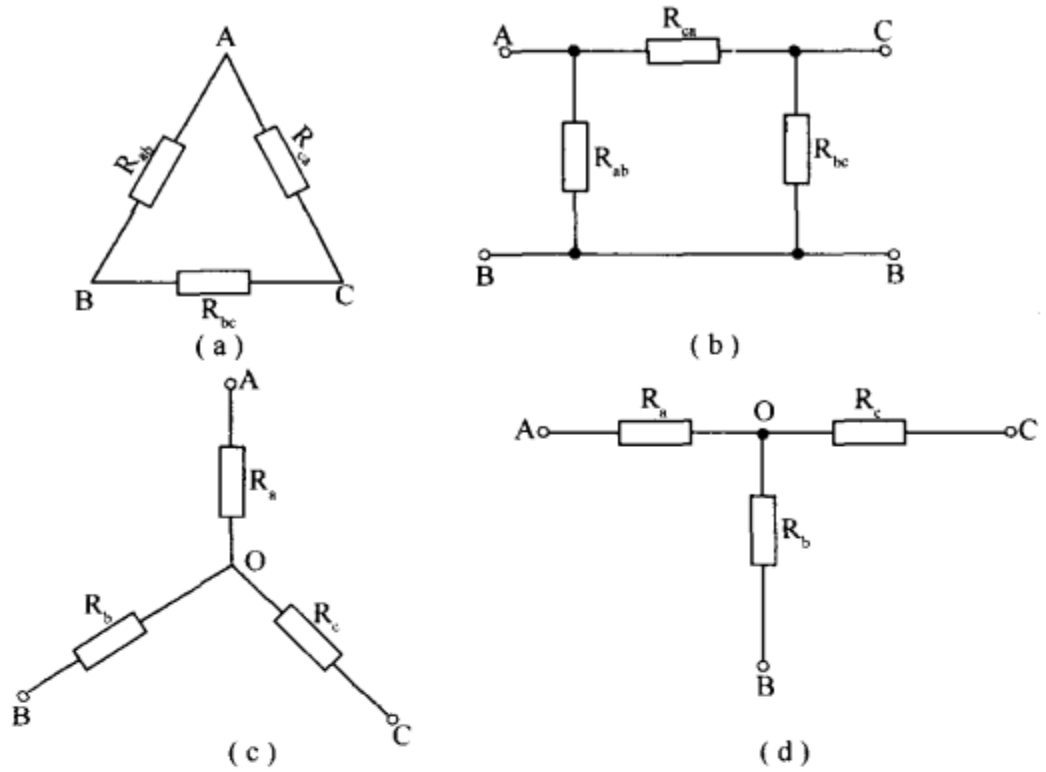


图 3-24　△和 Y 形联结

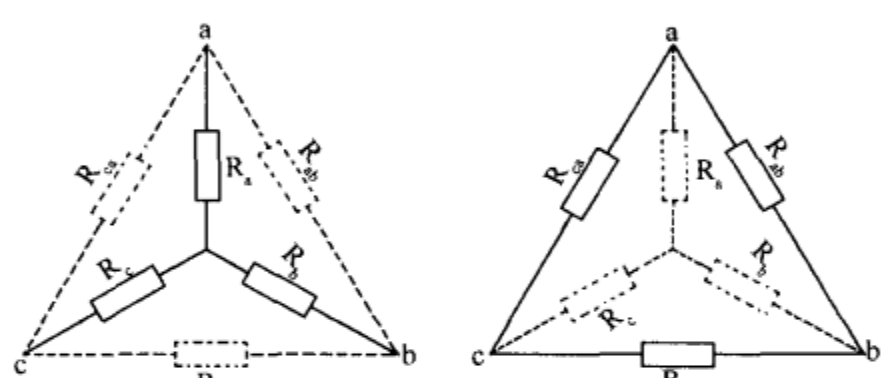


图 3-25　△联结和 Y 形联结的互换

对外电路来讲，在各结点电流、电位保持不变的情况下，Y 形联结和△形联结可以进行等效变换，其关系如下：

(1)△形联结变换为 Y 形联结公式(图 3-25(a))

$$R_a=\frac{R_{ab}\cdot R_{ca}}{R_{ab}+R_{bc}+R_{ca}}$$

$$R_b=\frac{R_{ab}\cdot R_{bc}}{R_{ab}+R_{bc}+R_{ca}}$$

$$R_c=\frac{R_{ca}\cdot R_{bc}}{R_{ab}+R_{bc}+R_{ca}}$$

当 $R_{ab}=R_{bc}=R_{ca}=R$ 时，则 $R_a=R_b=R_c=\frac{1}{3}R$

(2)Y 形联结变换为△形联结公式(图 3-25(b))

$$R_{ab}=\frac{R_aR_b+R_bR_c+R_cR_a}{R_c}$$

$$R_{bc}=\frac{R_aR_b+R_bR_c+R_cR_a}{R_a}$$

$$R_{ca}=\frac{R_aR_b+R_aR_c+R_bR_c}{R_b}$$

当 $R_a=R_b=R_c=R$ 时，则 $R_{ab}=R_{bc}=R_{ca}=3R$

例 10：如图 3-26 所示电路，求 AB 间的输入电阻。

解：将 3 个 3Ω 的电阻组成的三角形电路转化成星形电路，化简后电路如图 3-27 所示。

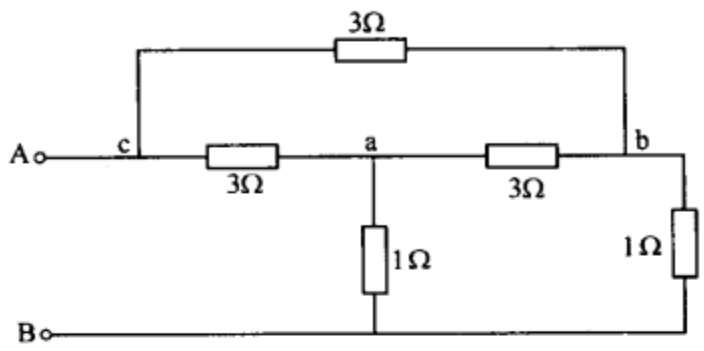


图 3-26　例 10 电路图

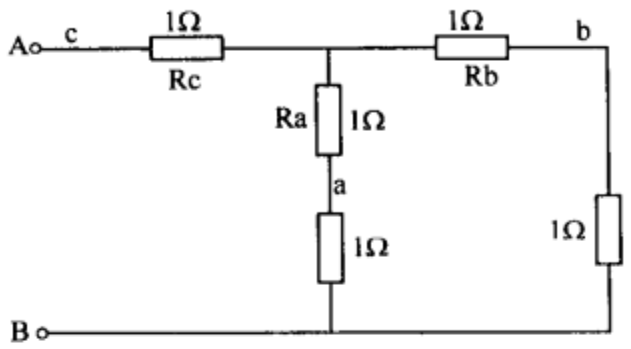


图 3-27　化简后的电路

图中，$R_a=R_b=R_c=\frac{1}{3}\times 3=1(\Omega)$

因此，$R_{AB}=[(1+1)//(1+1)]+1=2(\Omega)$

例 11：如图 3-28 所示电路，求 AB 间的输入电阻。

解：由图可见三个 1Ω 电阻是 Y 形联结，电路联结比较复杂，可以采用 Y 形联结与△形等效变换的方法进行求解。

将三个 1Ω 的电阻等效变换为△形联结后，如图 3-29 所示。

图中，$R_{ab}=R_{bc}=R_{ca}=3\times 1=3(\Omega)$。

从图中可见，3Ω 电阻与 6Ω 电阻是并联关系，故可用并联电阻的公式进行计算。

$$3//6=2(\Omega)$$

经再次化简后的电路如图 3-30 所示。

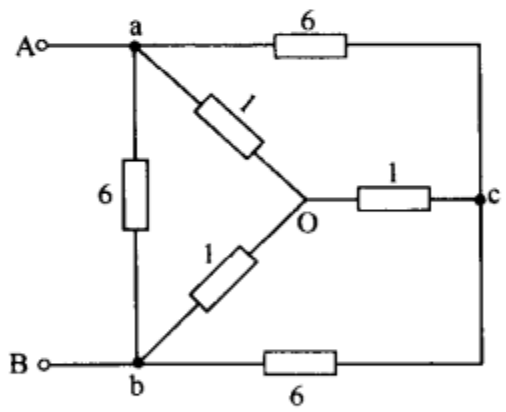


图 3-28　例 11 电路图

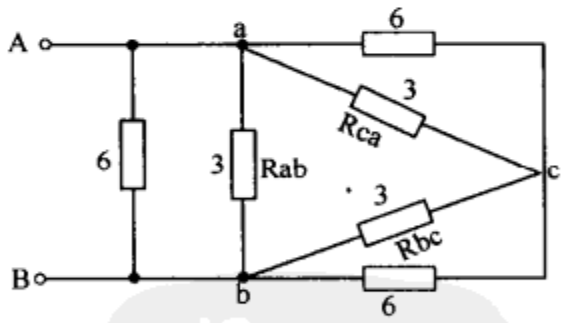


图 3-29　化简电路图

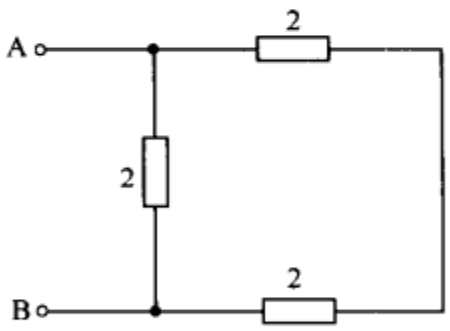


图 3-30　再次化简后的电路

从图中可以计算出 AB 间的等效电阻为

$$R_{AB}=2//(2+2)=1\frac{1}{3}(\Omega)$$

＊六、无穷网络电阻的求法

例 12：如图 3-31 所示，无穷网络由无限多个相同的电阻构成，每个电阻的阻值为 R，求这一网络的总电阻为多少？

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

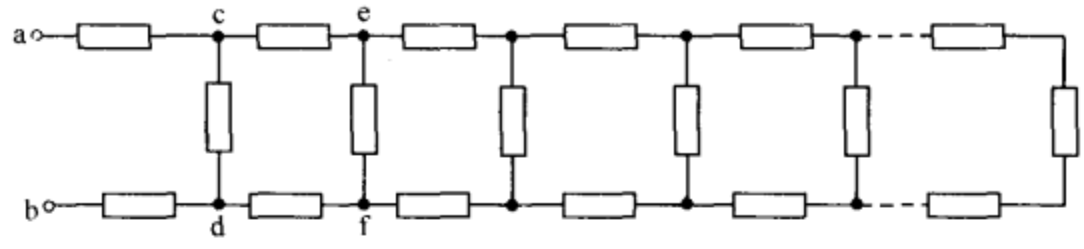


图 3-31　例 12 电路

解：设 a、b 两点间总电阻为：

$R_{ab}=2R+x$（x 为网络中其余电阻与 cd 间的电阻并联后的总电阻）

因网络无限，去掉一个网络还是无限网络，可在 e、f 处截止，令 $R_{ef}=x$。则 cefd 间的电阻为 $x+2R$，它与 cd 间的电阻 R 并联后，总电阻为 R_{cd}。

则
$$R_{cd}=x$$

即
$$\frac{(x+2R)R}{(x+2R)+R}=x$$

$$x^2+2Rx-2R^2=0$$

解方程得

$$x=(\sqrt{3}-1)R\text{（舍去负值）}$$

故
$$R_{ab}=2R+x=(\sqrt{3}+1)R$$

从以上例题可知，解这类题时，应充分利用无穷网络的性质——去掉其中之一无影响。

第二节　电压源、电流源及其等效变换

在组成电路的各个元件中，电源是一个有源元件。一个电源可以用两种不同的等效电路表示，一种是以输出电压为特征，称为电压源；另一种是以输出电流为特征，称为电流源。下面重点讨论电压源和电流源及其等效变换的方法。

一、电压源

通常一个有源元件的电路可用一电压源 U_s 和内阻 R_s 的串联电路进行表示，如图 3-32(a)所示。

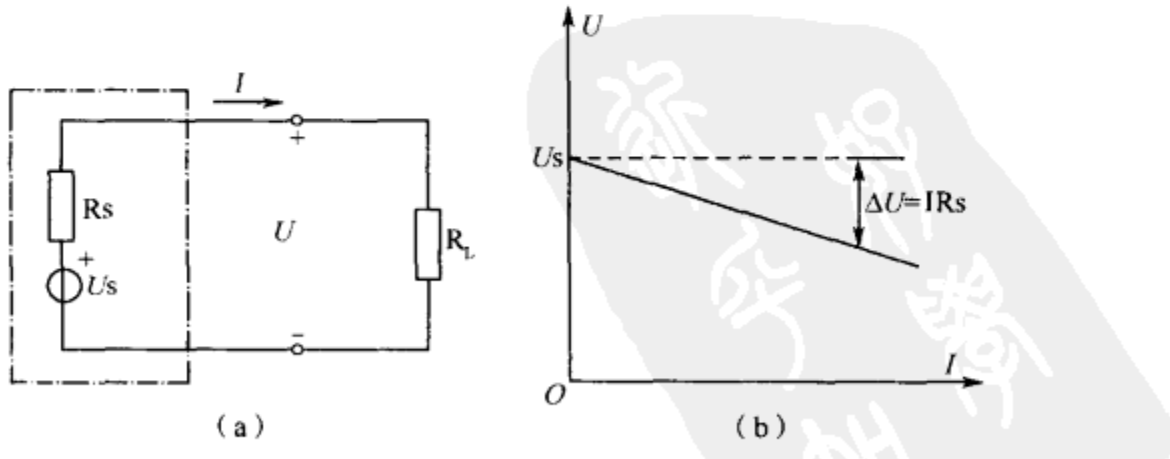


图 3-32　电压源及其外特性

图中，R_L 为负载电阻，I 为电源向负载输出的电流，电源的端电压为：

$$U=U_s-IR_s$$

上式说明，当电源的电压 U_s 和内阻 R_s 为定值时，电压源的端电压 U 与负载电流 I 成线性关系，可以用图 3-32(b)的直线表示，这条直线称为电压源的外特性曲线，简称外特性。也就是电源端电压 U 随输出电流 I 变化的伏安特性曲线。可以看出，当负载电流 I 增大时，电压源内阻压降也增大，电压源的端电压 U 则随之下降。

如果实际电源的内阻很小，则它们的外特性比较平坦，如果 $R_s=0$，根据 $U=U_s-IR_s$ 可知，这时电源的端电压为定值，即 $U=U_s$，与负载 R_L 无关。这样的电源称为理想电压源，又称恒压源，如图 3-33 虚线框内所示为理想电压源的符号，其外特性是一条平行于 I 轴的直线。

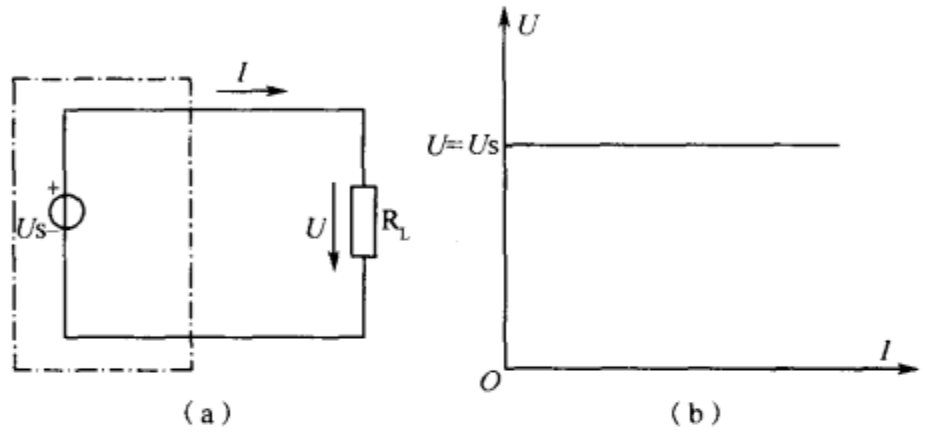


图 3-33　理想电压源及其外特性

理想的电压源实际上是不存在的，但是，如果一个电压源的电阻 R_s 比负载电阻 R_L 小很多时，即满足 $R_s \ll R_L$ 时，则端电压 U 基本恒定，可以认为是理想的电压源，如干电池、蓄电池、直流稳压电源等，其内阻都很小，可把它们看作理想电压源。

理想电压源具有以下性质：

①理想电压源的端电压 U 是恒定值，而与流过它的电流大小和方向无关。

②理想电压源所通过的电流可以是任意值，电流的大小和方向取决于与之相联结的外电路。

③几个理想电压源可以串联，其等效电压为其代数和。若理想电压源并联，其端电压必须相等。

④任一支路与理想电压源 U_s 并联时，等效电压仍为其端电压 U_s，而等效电压源的电流等于原电路外部电路电流。

二、电流源

实际电源除用源电压 U_s 和内阻 R_s 串联的电源模型来表示外，还可以用图 3-34 所示的另一种电源模型来表示，由图可得关系式：

$$I=I_s-\frac{U}{R_s}$$

式中，I_s 为电源的短路电流，I 为负载电流；而 U/R_s 是电源内阻 R_s 中流过的电流。

图 3-34(a)中虚线框是由电流源 I_s 和内阻 R_s 相并联的电源模型，称为电流源。

由式 $I=I_s-\frac{U}{R_s}$ 可知，电流源的电流 I_s 和内阻 R_s 为定值时，电流源的输出电流 I 与

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

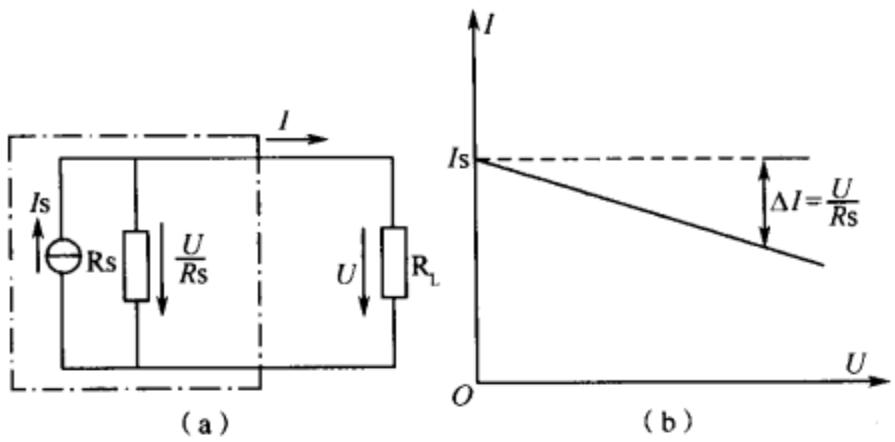


图 3-34　电流源及其负载特性

负载端电压 U 成线性关系，可以用图 3-34(b)中的直线表示。这条直线称为电流源的外特性曲线。

电源向外部输出的电流 I 总是小于 I_s，实际电流源的内阻 R_s 通常都很大。当负载变动时，电流源的输出电流 I 的大小取决于 R_s，R_s 愈大，内阻 R_s 分去的电流愈小，电流源输出电流就愈稳定。

如果电流源的内阻 $R_s=\infty$，这时电源供给负载的电流 I 为恒定值，即 $I=I_s$，与负载的大小无关，这种电流源称为理想电流源，又称恒流源。图 3-35(a)中虚线框内所示为理想电流源的符号，其外特性是一条平行于 I 轴的直线，如图 3-35(b)所示。

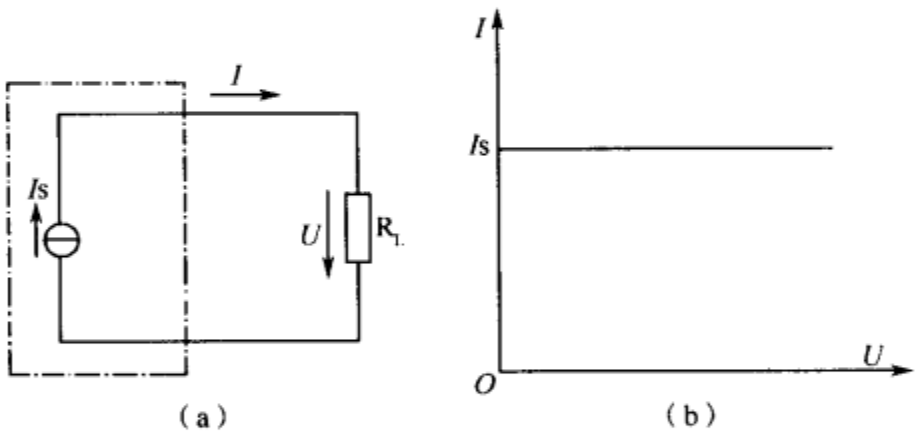


图 3-35　理想电流源及其负载特性

同理想电压源一样，理想电流源实际上是不存在的。但是，如果一个电源的内阻 R_s 比负载电阻大得多，即满足 $R_s \gg R_L$，可以认为是理想电流源。如光电池和工作在线性区的三极管都可近似看成理想电流源。

理想电流源具有以下性质：

①理想电流源输出的电流是恒定值 I_s，与其端电压无关。

②它的端电压是任意的，由外电路决定。

③几个理想电流源可以并联，其等效电流为其代数和。若理想电流源串联，则各电流源的电流必须相等。

④任一支路与理想电流源 I_s 串联时，等效电流仍为电流 I_s，而等效电流源的电压等于原电路外部电路电压。

三、电压源与电流源的等效变换

在电路分析计算中，以上两种电源模型是可以等效变换的。下面就来研究这两种实

际电源等效变换的条件。

对于电压源，根据 $U=U_s-IR_s$ 可得：

$$I=\frac{U_s-U}{R_s}=\frac{U_s}{R_s}-\frac{U}{R_s}$$

对于电流源，则有以下关系成立：

$$I=I_s-\frac{U}{R_s}$$

若它们对外电路等效，则以上两式的对应项应相等，因此等效变换条件为

$$I_s=\frac{U_s}{R_s}\text{或}U_s=I_sR_s$$

当两者满足以上关系，且电压源的内阻等于理想电流源的内阻时，这两种电源是可以互换的。电压源与电流源等效互换电路如图 3-36 所示。

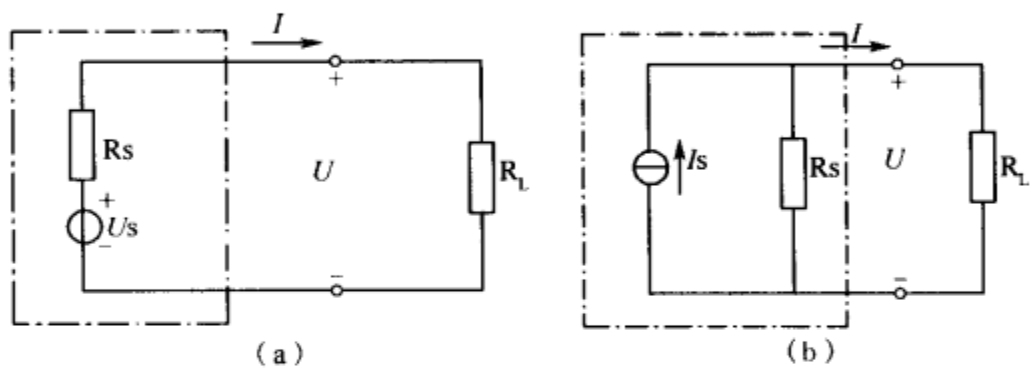


图 3-36　电压源和电流源的等效互换电路

电压源与电流源的等效变换非常简便，它可以使一些复杂电路的计算简化，是一种很实用的电路变换方法。电源的两种等效电路互相变换时，要注意以下几点：

①电压源和电流源的参考方向要一致，即电流源流出电流的一端应与电压源的正极相对应。

②所谓“等效”，是指它们对外电路等效，电源内部电路不等效。

③电压源与电流源进行等效变换时，必须遵循一条原则：变换时不影响未变换部分的每一支路上电压和电流的分布。这样的变换称为等效变换。

④理想电压源与理想电流源之间不能等效变换。因为理想电压源的内阻 $R_s=0$，而理想电流源的内阻 $R_s=\infty$，两者不满足等效变换条件。

四、电源的串并联

1. 电压源的串联

几个电压源相串联，可用一个等效电压源代替它们。等效电压源的电动势为各电压源的电动势代数和，其内阻为各电压源内阻的代数和。

2. 电流源的并联

几个电流源并联，可用一个等效的电流源代替它们。等效电流源的电流为各电流源电流的代数和，其内阻为各电流源内阻的并联值。

例 13：将如图 3-37 所示电路化为一等效的电流源。

解：这是一个两个电流源并联的电路，因此，可按电流源并联的方法进行合并，合并后的电流 $I_s=5-3=2(\text{A})$，方向向下。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

合并后电阻　　$R_s=6//3=2(\Omega)$

等效后的电路如图 3-38 所示。

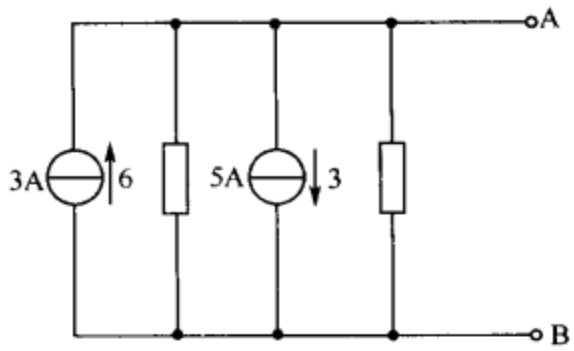


图 3-37　例 13 电路

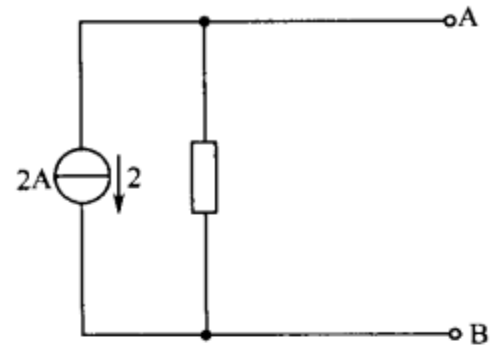


图 3-38　等效电路

3. 电压源的并联

电压源并联时，要将每一电压源变换为等效的电流源，然后按电流源并联的方法将各电流源合并，最后，再将等效的电流源变换为等效的电压源。

例 14：将图 3-39 所示的电路化为一等效电压源。

解：这是两个电压源并联的电路，应先将两个电压源变换为两个电流源，如图 3-40 所示。

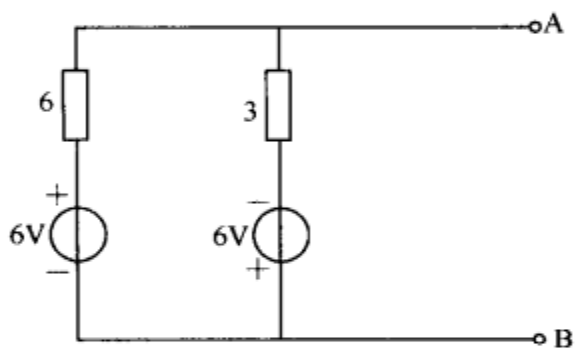


图 3-39　例 14 电路

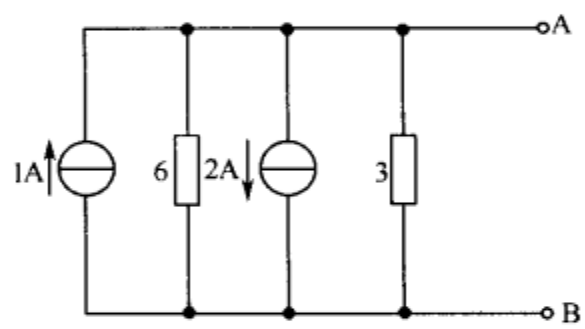


图 3-40　等效变换 1

再将两个电流源合并，如图 3-41 所示。

等效电流源的电流为 $I_s=-2+1=-1(\mathrm{A})$，方向向下。

内阻　　$R_s=3//6=2(\Omega)$

再将等效的电流源变为等效的电压源，如图 3-42 所示。

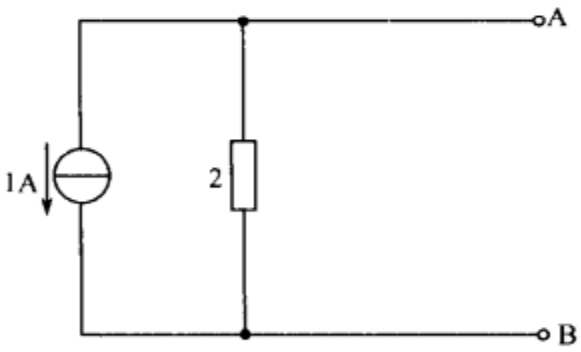


图 3-41　等效变换 2



图 3-42　等效变换 3

等效电动势 $E=1\times2=2(\mathrm{V})$，方向如图 3-42 所示。内阻为 2Ω。

4. 电流源串联

电流源串联时，要将电流源变换为等效的电压源，然后按电压源串联的方法将各电压源合并，最后，再将等效的电压源变换为等效的电流源。

例 15:将如图 3-43 所示电路化为一等效的电流源。

解:这是一个两个电流源相串联的电路,可先将两个电流源变换为两个等效电压源,如图 3-44 所示。

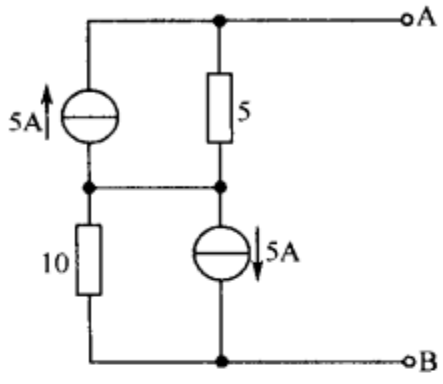


图 3-43　例 15 电路

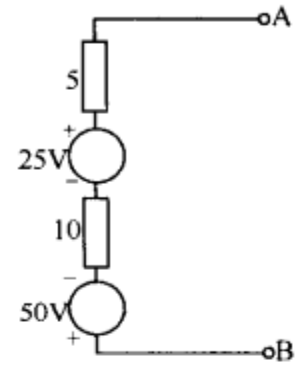


图 3-44　等效变换 1

将两个电压源合并后,如图 3-45 所示。

再将等效的电压源变换为等效的电流源,如图 3-46 所示。

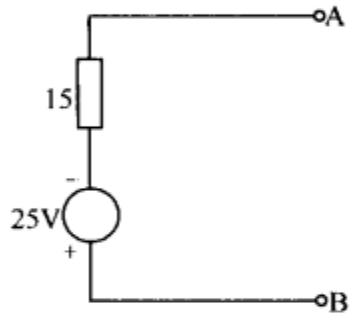


图 3-45　等效变换 2

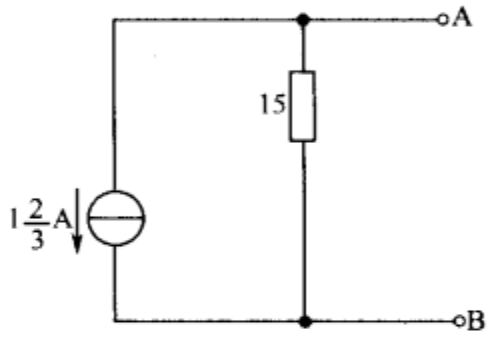


图 3-46　等效变换 3

5. 电压源与电流源串联

电压源与电流源串联时,要将电流源变换为等效的电压源,然后按电压源串联的方法进行处理。

例 16:将如图 3-47 所示电路化为一等效的电压源。

解:这是一个电压源与电流源串联的电路,要将电流源变换为等效的电压源。如图 3-48 所示。

将两个电压源合并后,得到如图 3-49 所示的电路。

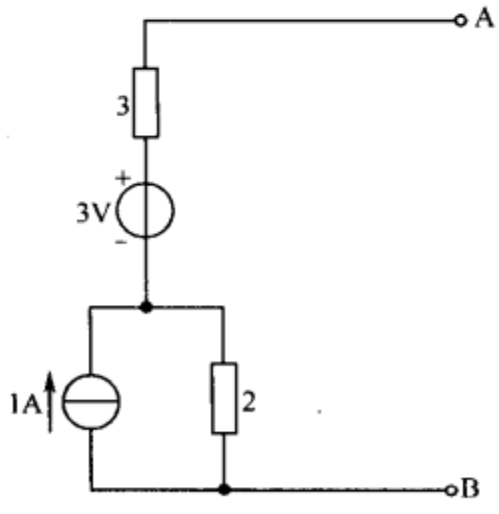


图 3-47　例 16 电路

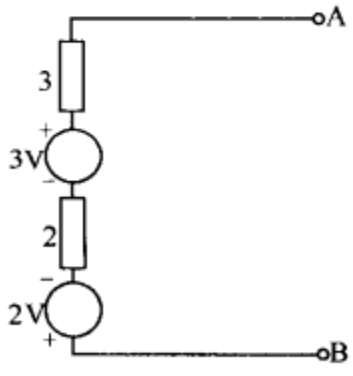


图 3-48　等效变换 1



图 3-49　等效变换 2

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

6. 电压源与电流源并联

电压源与电流源并联时，要将电压源变换为等效的电流源，然后按电流源并联的方法进行处理。

例 17：将如图 3-50 所示电路化为一等效的电压源。

解：这是一个电压源与电流源并联的电路，应将电压源变换为等效的电流源，如图 3-51所示。

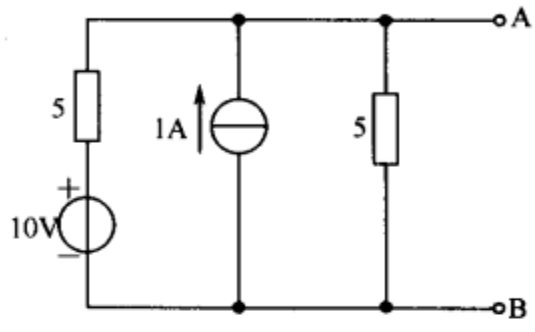


图 3-50　例 17 电路

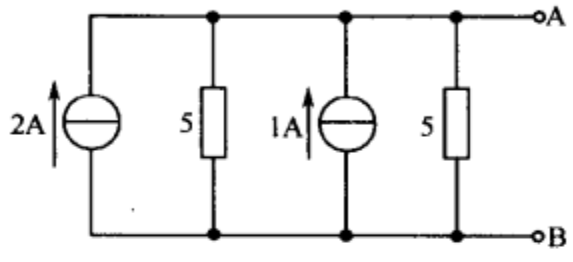


图 3-51　等效变换 1

将两个电流源合并，如图 3-52 所示。

将等效的电流源再变换为等效的电压源，如图 3-53 所示。

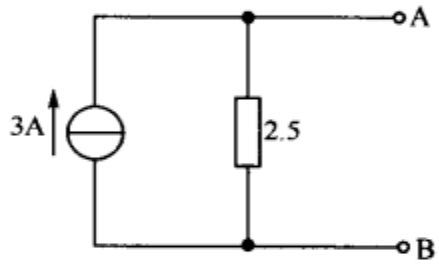


图 3-52　等效变换 2

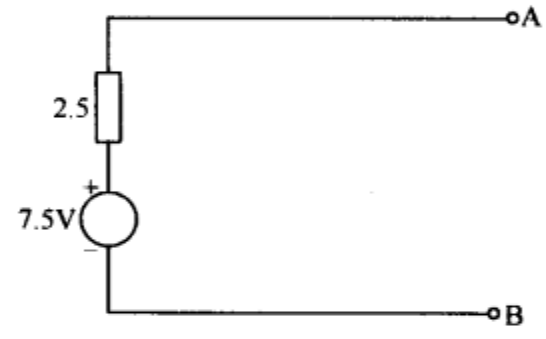


图 3-53　等效变换 3

归纳总结：根据以上分析可得到如下结论：两个电源并联时，要将电压源变换为等效的电流源；两个电源串联时，要将电流源变换为等效的电压源。

例 18：求图 3-54 所示电路中，2.5Ω 电阻的电流 I。

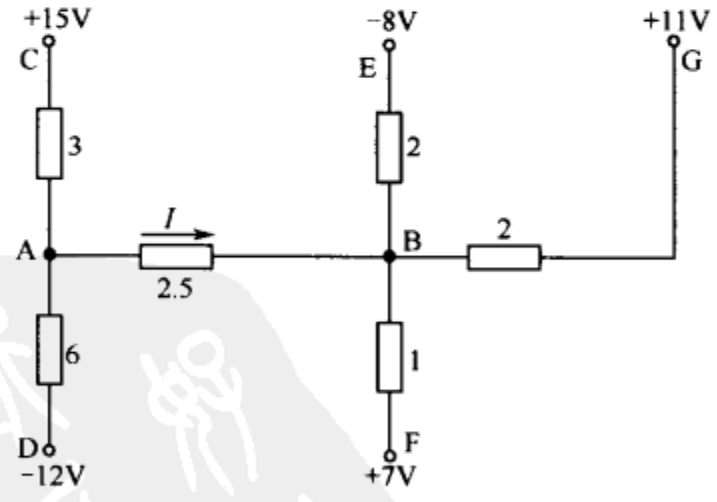


图 3-54　例 18 电路

解：本电路为一简单电路，所有电源均省略，是电路的另外一种画法，这种画法在模拟电子电路中最为常见。分析这种电路时，应首先将省略的电源补上，C、D、E、F、G 各点的电压表示该点相对于地的电位，可用恒压源表示，如图 3-55 所示。

将五个电压源都变换为电流源，如图 3-56 所示。

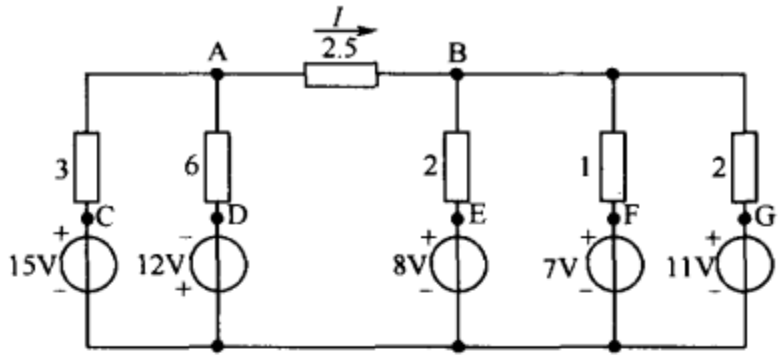


图 3-55　等效电路 1

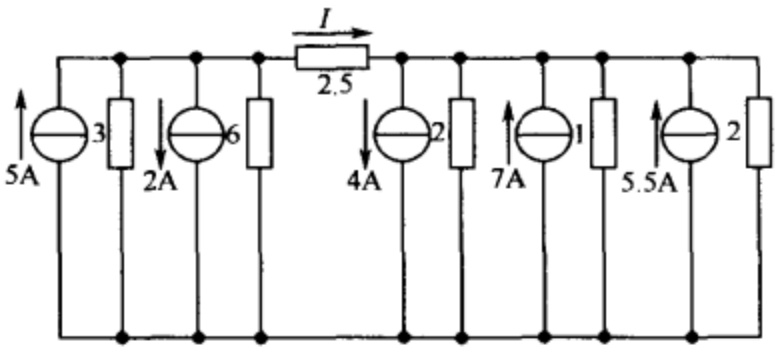


图 3-56　等效变换 2

将电流源合并，如图 3-57 所示。

再将电流源变换为电压源，如图 3-58 所示。

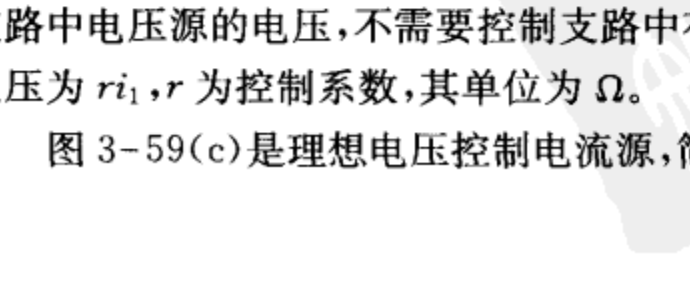


图 3-57　等效变换 3

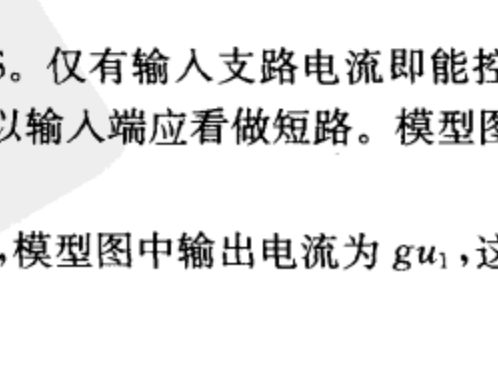


图 3-58　等效变换 4

由此可得 2.5Ω 电阻的电流为：

$$I=\frac{6-4.25}{2+2.5+0.5}=0.35(\mathrm{A})$$

*第三节　受控源简介

出于描述一些电子器件实际性能的需要，在电路模型中，包含有另一类电源——受控源。所谓受控源，即大小、方向受电路中其他地方的电压或电流控制的电源。这种电源有两个控制端（又称输入端）、两个受控端（又称输出端）。就其输出端所呈现的性能看，受控电压源可分为电压控制电压源与电流控制电压源两种。受控电流源可分为电压控制电流源与电流控制电流源两种。

图 3-59 分别表示上述四种理想受控源的模型。

图 3-59(a)为理想电压控制电压源，简称 VCVS。这种理想受控源，仅有控制支路电压即能控制输出支路中电压源的电压，不需要控制支路中有电流，所以控制支路应看做开路，而输出端的电压只取决于控制端电压。也就是说，如果控制支路电压为 u_1，在输出端的电压就等于 μu_1。μ 是控制系数，无量纲，u_1 控制着 μu_1 的大小、方向。若 u_1 增大，则 μu_1 亦增大；若 u_1 改变极性，则 μu_1 亦改变极性。

图 3-59(b)是理想电流控制电压源，简称 CCVS。仅有输入支路电流即能控制输出支路中电压源的电压，不需要控制支路中有电压，所以输入端应看做短路。模型图中输出电压为 ri_1，r 为控制系数，其单位为 Ω。

图 3-59(c)是理想电压控制电流源，简称 VCCS，模型图中输出电流为 gu_1，这里 g 为

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

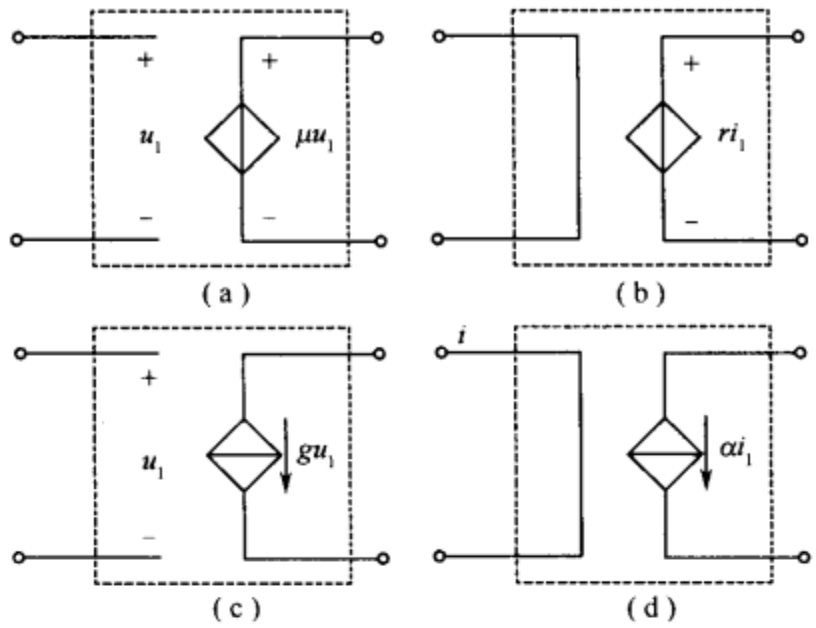


图 3-59　理想受控源模型

控制系数，其单位为 S(西门子)。例如，场效应管漏极电流受栅极电压控制，所以，场效应管是一种电压控制电流源。

图 3-59(d)是理想电流控制电流源，简称 CCCS，模型图中输出电流为 αi_1，α 为控制系数，无量纲。例如，晶体三极管集电极电流受基极电流控制，因此，晶体三极管就是一种电流控制的电流源。

需要说明的是，独立源与受控源在电路中的作用有着本质的区别。独立源作为电路的输入，代表着外界对电路的激励作用，是电路中产生响应的“源泉”，受控源用来表征在电子器件中所发生的物理现象的一种模型，它反映了电路中某处的电压或电流控制另一处的电压或电流的关系。在电路中，受控源不是激励源。

第四章　电路基本分析方法和重要定理

凡是不能用串联和并联方法简化为简单回路的电路(或能简化却相当复杂的电路),称为复杂电路。分析和计算复杂电路时,一般也要用到欧姆定律和基尔霍夫定律。在进行计算时,往往由于电路复杂,计算手续极为烦琐,因此,要根据电路的结构特点去寻找分析与计算的简便方法。本章中将扼要讨论几种常用的电路分析方法和重要定理,其中,支路电流法、戴维南定理是分析电路的基本方法与定理,也是本章的重点。

第一节　电路基本分析方法

一、支路电流法

支路电流法是计算复杂电路的最基本方法,它以各支路电流为未知量,根据基尔霍夫电压和电流定律,列出必要的电路方程,求解各支路电流,进而求出电压或功率。

1. 方法步骤

下面以图 4-1 所示的两个电源并联的电路为例,说明支路电流法的应用。

在本电路中,有三条支路,两个结点 a 和 b,要求出三条支路的电流,需列出三个独立方程联立求解。所谓独立方程是指该方程不能通过已经列出的方程演变而来。

在列方程之前,首先必须在电路图中选定未知支路电流的参考方向。按图 4-1 中选定的参考方向,根据基尔霍夫电流定律可列出两个电流方程:

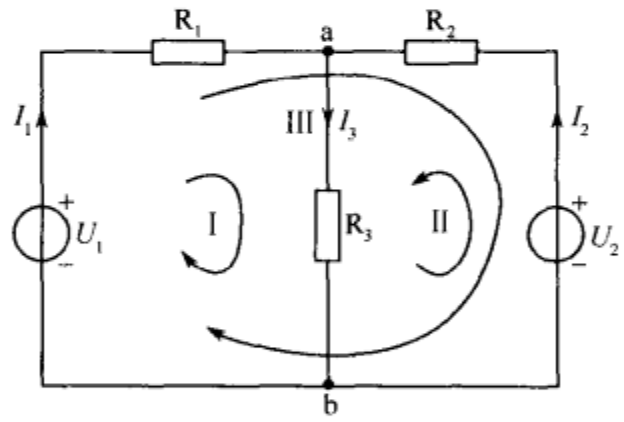


图 4-1　两个电源并联的电路

对于结点 a:$I_1+I_2-I_3=0$　　(4-1)

对于结点 b:$I_3-I_1-I_2=0$　　(4-2)

比较以上两式发现,只有一个方程是独立的。因为式(4-2)可由式(4-1)导出,同理,式(4-1)也可由式(4-2)导出。所以对具有两个结点的电路,应用基尔霍夫电流定律,只能列出一个独立方程。

一般来说,对具有 n 个结点的电路应用基尔霍夫电流定律只能列出($n-1$)个独立方程。

图 4-1 中有三个回路:即回路Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ,根据基尔霍夫电压定律可列出三个回路电压方程。回路的绕行方向如图 4-1 所示,设电压升高为正,电压降低为负。

对于回路Ⅰ:　　$U_1-I_1R_1-I_3R_3=0$　　(4-3)

对于回路Ⅱ:　　$U_2-I_2R_2-I_3R_3=0$　　(4-4)

对于回路Ⅲ:　　$U_1-I_1R_1+I_2R_2-U_2=0$　　(4-5)

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

以上三个方程中，实际上只有两个是独立方程，因为式(4-5)可以从前面两个方程导出。在列回路方程时，要使所列出的方程都是独立方程，就得适当选取回路。一般来说，在电路分析中，选取以网孔为回路列出的电压方程一定为独立方程。如图 4-1 所示电路有两个网孔，可列出两个独立的回路电压方程。

由以上分析可知，对于图 4-1 所示的电路可列出如下独立方程：

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \tag{4-6}$$

$$U_1 - I_1 R_1 - I_3 R_3 = 0 \tag{4-7}$$

$$U_2 - I_2 R_2 - I_3 R_3 \tag{4-8}$$

将以上方程联立求解，即可求出各支路的电流 I_1、I_2、I_3。若求出的数值为正，则表示该电流的实际方向与参考方向相同；若求出的数值为负，则表示电流的实际方向与参考方向相反。

现在，把用支路电流法计算复杂电路的解题步骤归纳如下：

①确定已知电路的支路数和结点数，标注电流的参考方向和网孔绕行方向。

②应用基尔霍夫电流定律，列写独立电流方程式，规定与参考方向一致的电流为正，与参考方向相反的电流为负。

③应用基尔霍夫电压定律，列写独立电压方程式，一般规定沿绕行方向上，电压上升为正，电压下降为负。

④解方程，求出支路电流。

2. 适用范围

支路电流法原则上适用于各种复杂电路，但当支路数很多时，方程数增加，计算量加大。因此，支路电流法适用于支路较少的电路。

需要说明的是，当用支路电流法分析含有理想电流源的电路时，由于理想电流源所在支路的电流为已知，所以可少列一个方程，因此，在列回路方程时要避开理想电流源支路。

3. 应用举例

例 1：试用支路电流法求图 4-2 所示电路的各支路电流。

解：该电路共有三条支路、两个结点和两个网孔。求解三个支路电流应列三个独立方程，其中一个为结点的 KCL 方程，两个为网孔的 KVL 方程。

对于结点 a，列 KCL 方程有：

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

对于两个网孔，图中画出了绕行方向(顺时针)，取沿绕行方向上，电压上升为正，电压下降为负。列 KVL 方程有：

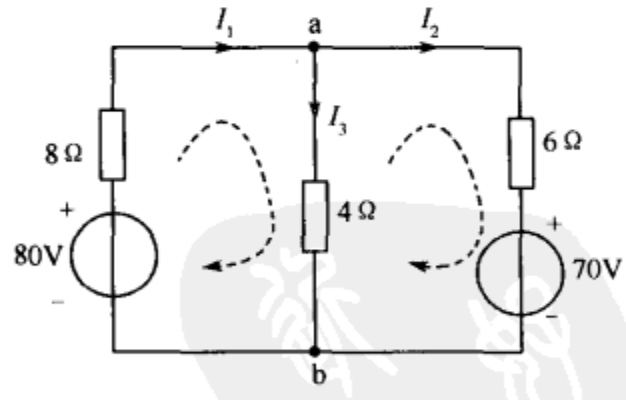


图 4-2　例 1 电路

$$80 - 8I_1 - 4I_3 = 0$$

$$-70 + 4I_3 - 6I_2 = 0$$

解由以上三式组成的方程组得

$$I_1 = 5\text{A}, I_2 = -5\text{A}, I_3 = 10\text{A}$$

例 2：如图 4-3 所示为一用电桥测量电阻的电路，求出各支路的电流。

解：该电路有四个结点，六条支路和三个网孔，各支路电流的参考方向和网孔的绕行方向已标示在图中。

对于结点 a，列 KCL 方程有：$I-I_1-I_4=0$

对于结点 b，列 KCL 方程有：$I_1+I_3-I_2=0$

对于结点 C，列 KCL 方程有：$I_2+I_5-I=0$

设沿绕行方向上，电压上升为正，电压下降为负，对于网孔Ⅰ，列 KVL 方程有：$-20I_1+40I_3+36I_4=0$

对于网孔Ⅱ，列 KVL 方程有：$-50I_2+10I_5-40I_3=0$

对于网孔Ⅲ，列 KVL 方程有：$12-36I_4-10I_5=0$

联立以上方程求解得

$I_1=0.24\text{A}$，$I_2=0.144\text{A}$，$I_3=-0.096\text{A}$，$I_4=0.24\text{A}$，$I_5=0.336\text{A}$，$I=0.48\text{A}$

例 3：用支路电流法求图 4-4 所示电路中各支路的电流。

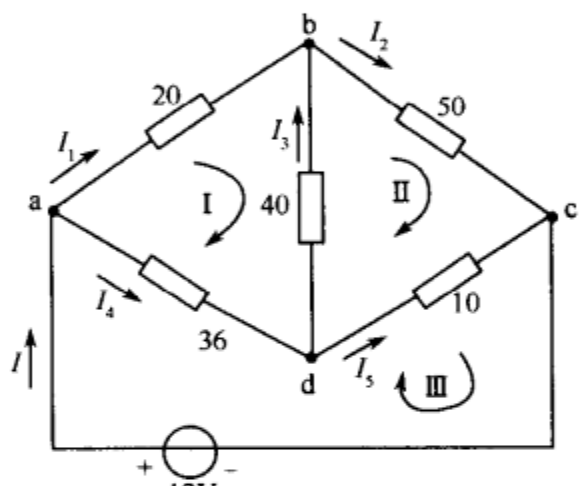


图 4-3　例 2 电路

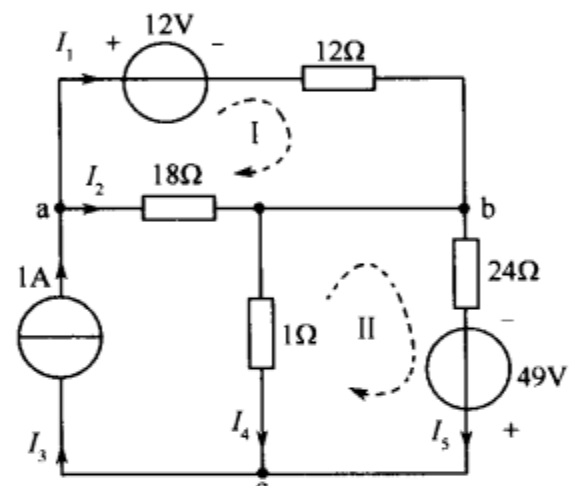


图 4-4　例 3 电路

解：图 4-4 共有五条支路、三个结点。求五个支路电流应列五个独立方程，但是，因为电流源所在支路的电流已知，所以，本题只需列四个独立方程即可，其中包括两个结点的 KCL 方程和两个网孔的 KVL 方程。

各支路电流的参考方向和网孔的绕行方向已标示在图中。

对于结点 a，列 KCL 方程有：$I_3-I_1-I_2=0$

对于结点 c，列 KCL 方程有：$I_4+I_5-I_3=0$

设沿绕行方向上，电压上升为正，电压下降为负，对于网孔Ⅰ，列 KVL 方程有：$-24-12I_1+18I_2=0$

对于网孔Ⅱ，列 KVL 方程有：$49+I_4-24I_5=0$

联立以上方程求解得

$I_1=-0.2\text{A}$，$I_2=1.2\text{A}$，$I_4=-1\text{A}$，$I_5=2\text{A}$

二、结点电压法

支路电流法虽是分析计算复杂电路的基本方法，但电路网孔比较多时，用支路电流法求解就相当麻烦。因此，分析网孔多而结点少的电路时，常用另外一种电路分析方法——结点电压法。结点电压法是以电路中结点电压为待求量，对复杂电路进行分析计算的一

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

种方法。求出结点电压后，所有支路的电压就确定了，再对各支路运用基尔霍夫定律或欧姆定律，求出各支路电流及其他待求量。

1. 方法步骤

结点电压法特别适宜结点少而支路多的电路分析。例如，图 4-5 所示电路为四条支路并联的电路。这个电路的特点是结点少、支路数多，所有支路都接在两结点之间。选 b 点为参考点，两个结点 a 和 b 间的电压 U_{ab} 称为结点电压，在图中，电压的正方向由 a 指向 b。

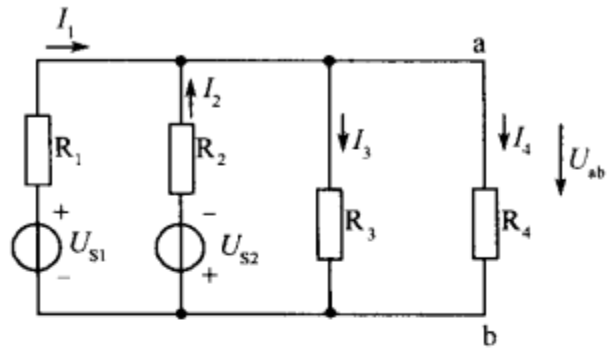


图 4-5　多支路电路

设各支路电流方向如图 4-5 所示，对于结点 a，列出 KCL 方程有：

$$I_1+I_2-I_3-I_4=0 \tag{4-9}$$

各支路电流可由基尔霍夫电压定律求出：

$$U_{S1}-R_1 I_1-U_{ab}=0 \tag{4-10}$$

$$-U_{S2}-R_2 I_2-U_{ab}=0 \tag{4-11}$$

$$R_3 I_3-U_{ab}=0 \tag{4-12}$$

$$R_4 I_4-U_{ab}=0 \tag{4-13}$$

解以上方程，可得到结点电压的公式

$$U_{ab}=\frac{\dfrac{U_{S1}}{R_1}+\dfrac{-U_{S2}}{R_2}}{\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R_3}+\dfrac{1}{R_4}}=\frac{\sum\dfrac{U}{R}}{\sum\dfrac{1}{R}} \tag{4-14}$$

现在，把用结点电压法计算复杂电路的解题步骤归纳如下：

①设参考点（零电位点），其他结点对参考点的电位（结点电压）均以参考点为负极。

②标出各支路电流参考方向。

③用式（4-14）求出结点电压 U_{ab}。

2. 适用范围

结点电压适用于全面求解电路支路电压及电流，特别是支路较多、结点数少的复杂电路。

3. 应用举例

例 4：用结点电压法求图 4-6 所示电路中各支路电流。

解：这是一个由四个电源并联供电的电路，设结点电压 U_{ab} 和各支路电流方向如图所示。因 U_1、U_2、U_3 与 U_{ab} 方向相同，故取正号，U_4 方向与 U_{ab} 方向相反，故取负号。

根据结点电压公式，可得

$$U_{ab}=\frac{\dfrac{U_1}{R_1}+\dfrac{U_2}{R_2}+\dfrac{U_3}{R_3}+\dfrac{-U_4}{R_4}}{\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R_3}+\dfrac{1}{R_4}+\dfrac{1}{R_5}}=\frac{\dfrac{60}{1}+\dfrac{60}{2}+\dfrac{60}{2}+\dfrac{-60}{1}}{\dfrac{1}{1}+\dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{1}+\dfrac{1}{1}}=15(\mathrm{V})$$

因此，各支路电流为

$$I_1=\frac{U_1-U_{ab}}{R_1}=\frac{60-15}{1}=45(\mathrm{A})$$

$$I_2=\frac{U_2-U_{ab}}{R_2}=\frac{60-15}{2}=22.5(\mathrm{A})$$

$$I_3=\frac{U_3-U_{ab}}{R_3}=\frac{60-15}{2}=22.5(\mathrm{A})$$

$$I_4=\frac{-U_4-U_{ab}}{R_4}=\frac{-60-15}{1}=-75(\mathrm{A})$$

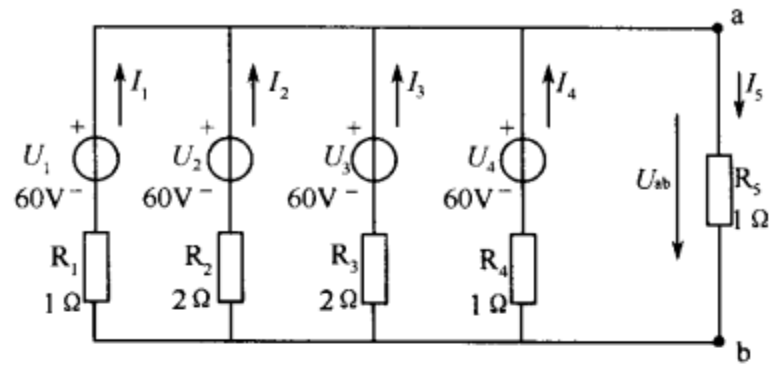


图 4-6　例 4 电路

负值表示 I_4 实际方向与图中参考方向相反。

$$I_5=\frac{U_{ab}}{R_5}=\frac{15}{1}=15(\mathrm{A})$$

第二节　电路分析重要定理

一、叠加原理

在图 4-7 所示的电路中有两个电源，各支路中的电流是由这两个电源共同作用产生的。任何一个支路中的电流，都可以看成是由电路中各个电源分别作用时，在此支路中所产生的电流的代数和。这就是叠加原理。

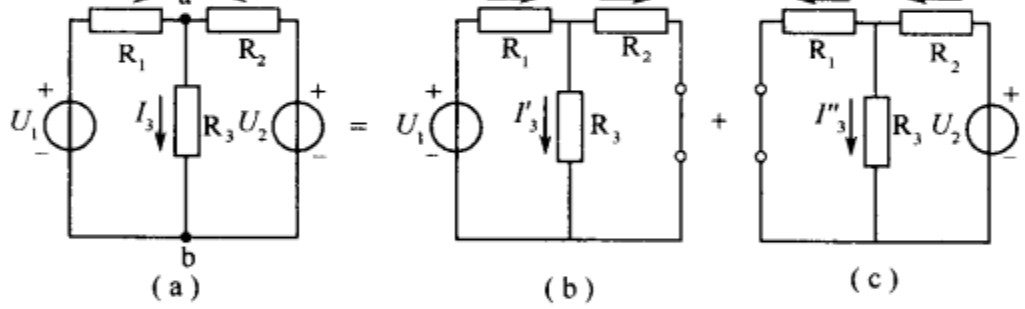


图 4-7　叠加原理

下面以图 4-7 为例，说明叠加原理的正确性。如以支路电流 I_1 为例，它可用支路电流法求出。根据基尔霍夫电流和电压定律，列出以下方程：

$$I_1+I_2-I_3=0$$

$$U_1-I_1R_1-I_3R_3=0$$

$$U_2-I_2R_2-I_3R_3=0$$

而后解之，得

$$I_1=\frac{R_1+R_3}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}U_1-\frac{R_3}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}U_2$$

设 $I'_1=\dfrac{R_2+R_3}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}U_1$

$$I''_1=\frac{R_3}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}U_2$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

于是 $I_1 = I_1' - I_1''$

显然，I_1 是当电路中只有 U_1 单独作用时，在第一支路中产生的电流，而 I_1'' 是当电路中只有 U_2 单独作用时，在第一支路中产生的电流，由于 I''_1 与 I_1 的方向相反，所以带负号。

同理：

$$I_2 = I_2'' - I_2'$$

$$I_3 = I_3' + I_3''$$

由此可见，用叠加原理计算复杂电路，就是把一个多电源的复杂电路化为几个单电源的电路来进行计算。

叠加原理不仅可用来计算复杂电路，而且也是线性电路的普遍原理。

注意事项：应用叠加原理时要注意以下几点：

①叠加原理只适用于线性电路，它只能用来分析线性电路的电流和电压，而不能用叠加原理来计算电路的功率。

②在对电路中电流或电压进行叠加时，要注意各支路电压或电流的参考方向。凡是电压或电流分量的参考方向与原支路电压或电流的参考方向一致时，取正号，反之则取负号。

③所谓某一电源单独作用，就是假设其余电源除去，即将电压源中的理想电压源用短路代替；把电流源中理想电流源 I_s 断开，但电路中的其他元件及电路联结方式都保持不变。

例 5：如图 4-8 所示电路，用叠加原理求 I。

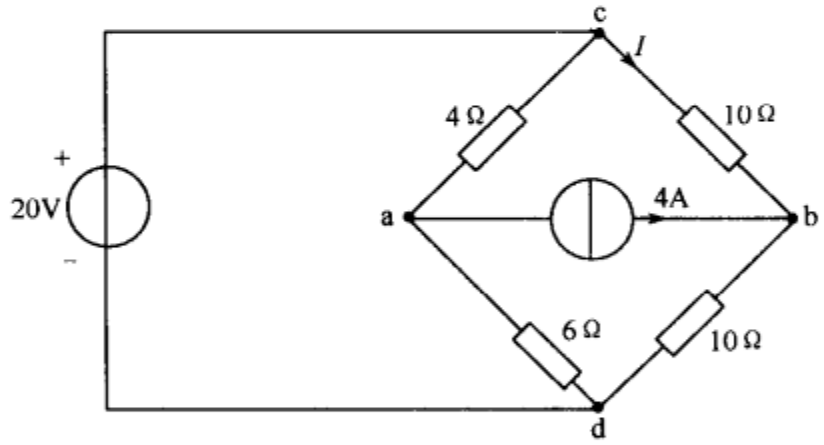


图 4-8　例 5 电路

解：根据叠加原理，图 4-8 可分为图 4-9 所示的两个电路。图 4-10 为图 4-9 所示电路对应的等效电路。

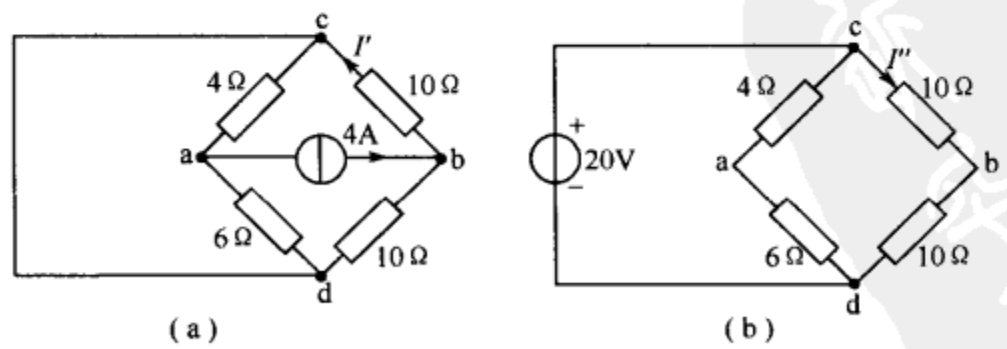


图 4-9　例 5 分解图

当 4A 电流源单独作用时，从图 4-10(a)中可以得到

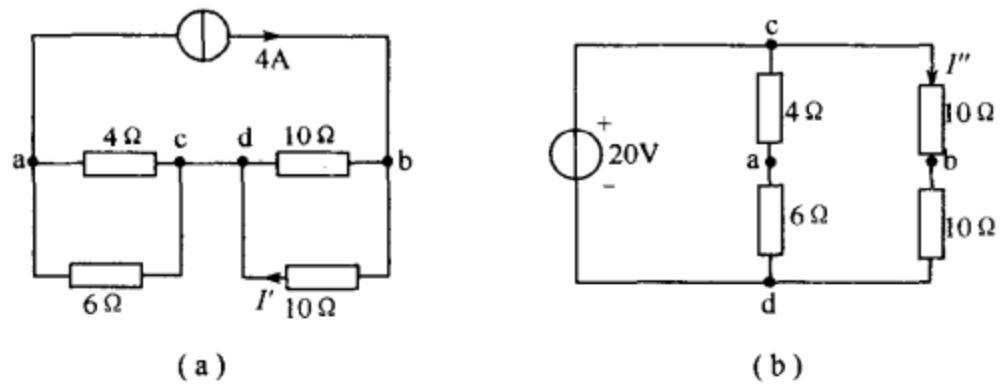


图 4-10　分解图对应等效电路

$$I'=\frac{10}{10+10}=2(\mathrm{A})$$

当 20V 电源单独作用时，从图 4-10(b)中可以得到

$$I''=\frac{20}{10+10}=1(\mathrm{A})$$

根据叠加原理可得到

$$I=I''-I'=1-2=-1(\mathrm{A})$$

二、戴维南定理

有些情况下，只需计算一个复杂电路中某个支路的电流。如果用上述方法计算，必然会引出一些不需要的电流，使计算过程复杂。为了使简便计算，常常应用戴维南定理或诺顿定理。

1. 二端网络

任何电路，不论是简单的还是复杂的，只要它具有两个端，则称它为二端网络。根据它内部是否含有电源，又分为无源二端网络和有源二端网络，图 4-11(a)为无源二端网络，图 4-11(b)为有源二端网络。

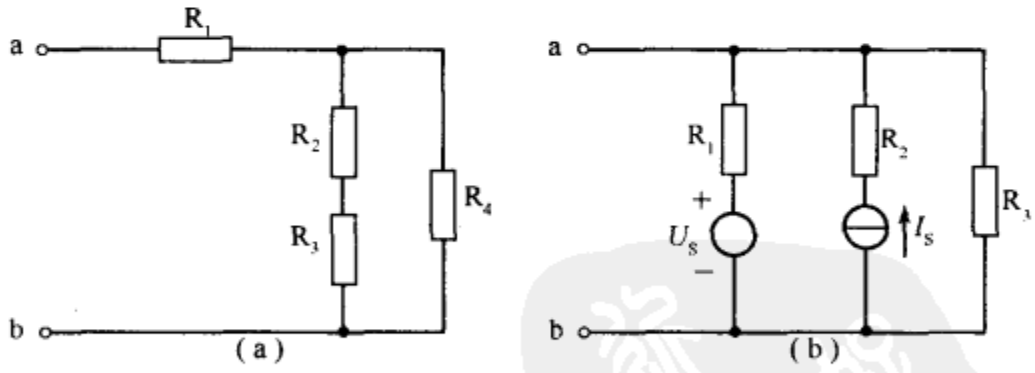


图 4-11　无源二端网络和有源二端网络

2. 戴维南定理

任何一个线性有源二端网络，对外电路来讲，都可以用一个电压源 U_s 和内阻 R_s 串联的组合电源模型来代替。电压源的电压等于有源二端网络的开路电压(将负载断开后，a、b 两端间的电压)，等效电源的内阻等于有源二端网络中所有独立电源为零($U_s=0$，理想电压源短路；$I_s=0$，理想电流源开路)时的等效电阻。这就是戴维南定理。根据戴维南定理作出的等效电路，称为戴维南等效电路，如图 4-12 所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

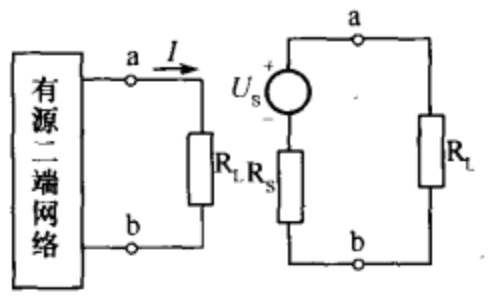


图 4-12　戴维南定理等效电路

3. 应用举例

例 6：如图 4-13 所示电路，用戴维南定理求电路中 6Ω 电阻上的电流。

解：①将 6Ω 电阻所在支路从电路中划分出来，如图 4-14 所示。

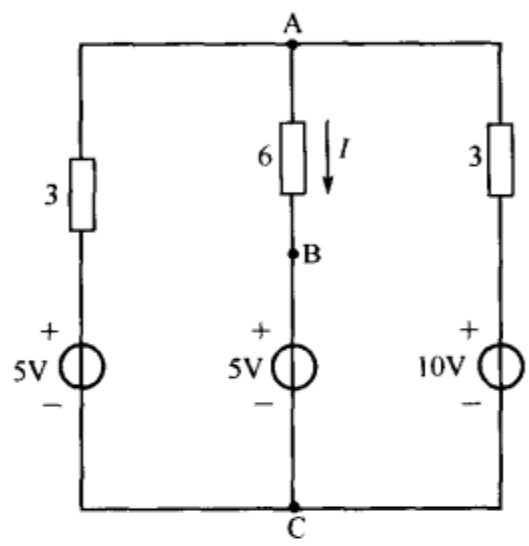


图 4-13　例 6 电路

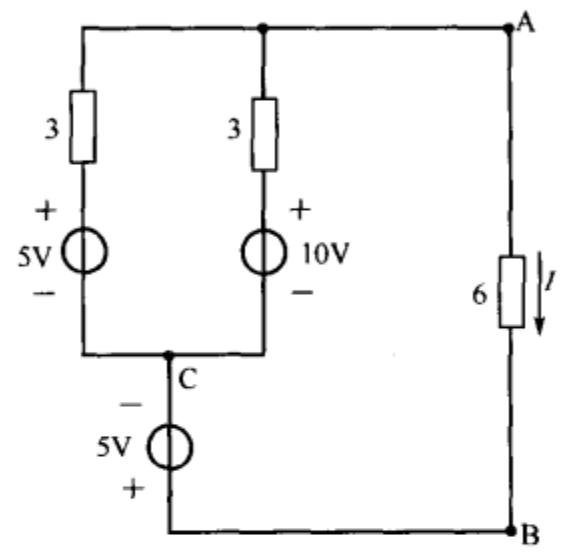


图 4-14　例 6 等效电路

②求开路电压 U_{AB}。

将 AB 支路断开，如图 4-15 所示。

先将 AC 间的两并联的电压源变换为电流源，如图 4-16 所示。

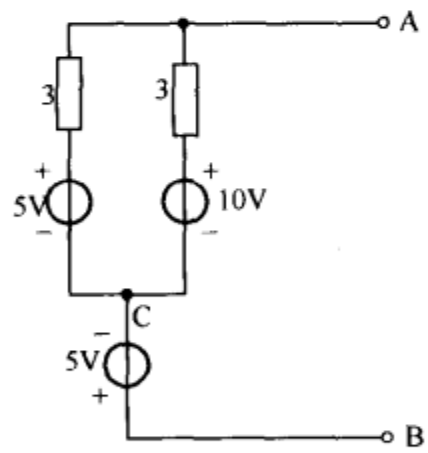


图 4-15　断开 AB 支路后的电路

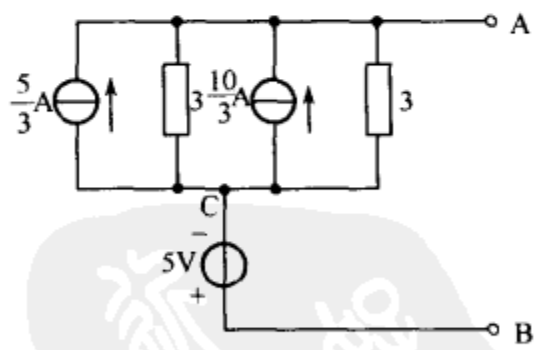


图 4-16　变换为电流源

将 AC 间的两个电流源合并，如图 4-17 所示。

将电流源变换为等效的电压源，如图 4-18 所示。

从图中可以看出，AB 间的开路电压 $U_{AB}=7.5-5=2.5(V)$。

③求除源二端网络的等效电阻 R_{AB}。

将含源二端网络中的各电压源用短路线代替，如图 4-19 所示。

从图中可以看出，除源二端网络的等效电阻 $R_{AB}=3//3=1.5\Omega$。

④求 6Ω 上的电流 I

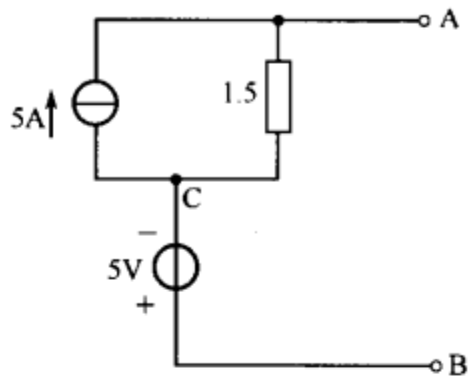


图 4-17　合并电流源后的电路

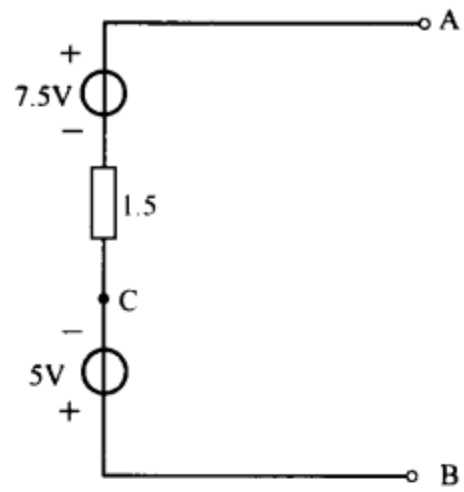


图 4-18　将电流源变换为等效电压源

根据以上可得等效电压源如图 4-20 所示。

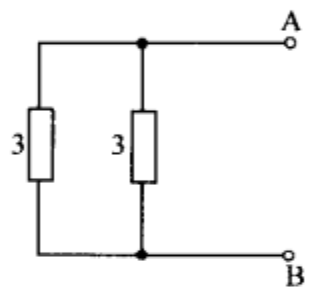


图 4-19　求除源二端网络的等效电阻

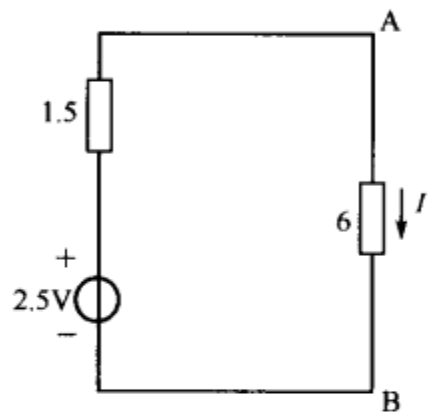


图 4-20　例 6 等效电压源

从等效电源图中可以得到，6Ω 上的电流为：

$$I=\frac{2.5}{1.5+6}=\frac{2.5}{7.5}=\frac{1}{3}\text{A}$$

例 7：如图 4-21 所示电路，用戴维南定理求电路中 4Ω 电阻上的电流。

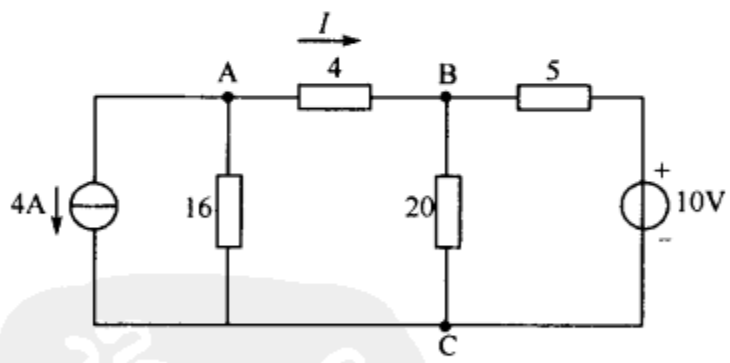


图 4-21　例 7 电路

解：①将 4Ω 电阻所在支路从电路中划分出来，如图 4-22 所示。

②求开路电压 U_{AB}。

将 AB 支路断开，如图 4-23 所示。

先将 AC 间的电流源变换为电压源，将 CB 间的电压源变换为电流源，如图 4-24 所示。

20Ω 和 5Ω 并联后的电阻为 4Ω，因此，图 4-24 等效为图 4-25。

将 CB 间的电流源变换为电压源，如图 4-26 所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

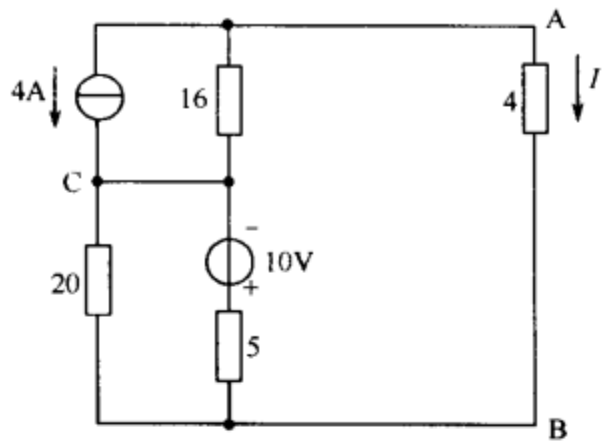


图 4-22　例 7 等效电路

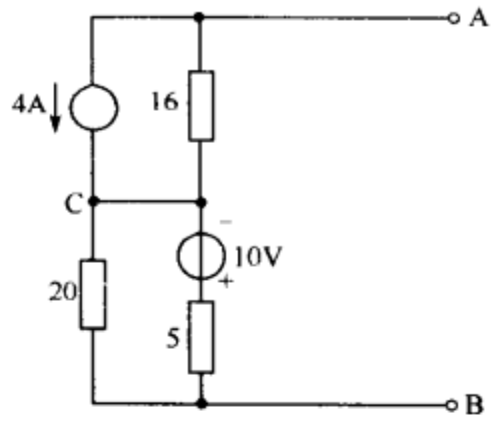


图 4-23　断开 AB 支路后的电路

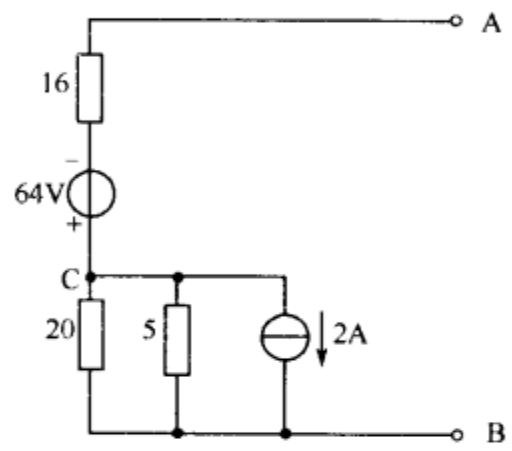


图 4-24　变换后的电路

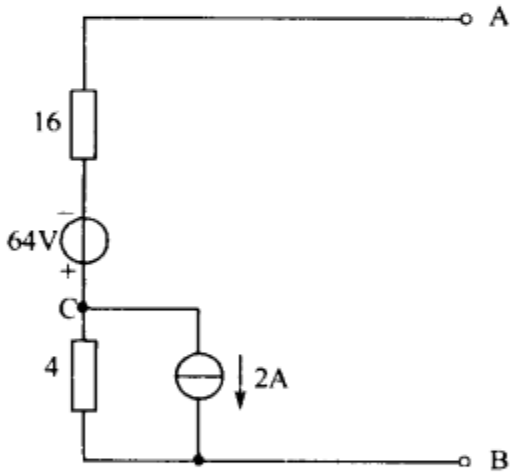


图 4-25　简化后的电路

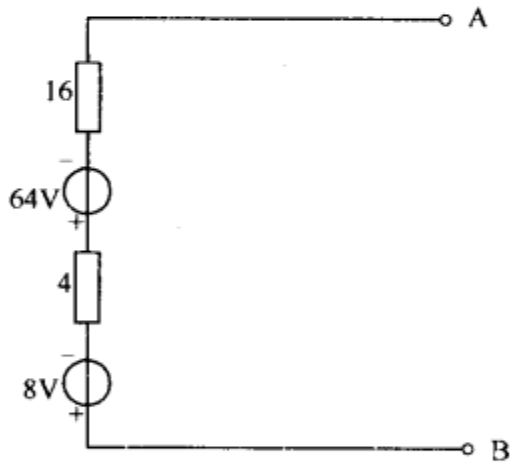


图 4-26　将 CB 间的电流源变换为电压源

从图中可以看出，AB 间的开路电压 $U_{AB}=-64+(-8)=-72(\mathrm{V})$。

③求除源二端网络的等效电阻 R_{AB}。

将含源二端网络中的各电压源用短路线代替，将电流源开路，如图 4-27 所示。

从图中可以看出，除源二端网络的等效电阻 $R_{AB}=16+20//5=20\Omega$。

④求 4Ω 上的电流 I

根据以上可得等效电压源如图 4-28 所示。

从等效电源图中可以得到，4Ω 上的电流为：

$$I=-\frac{72}{20+4}=-\frac{72}{24}=-3(\mathrm{A})$$

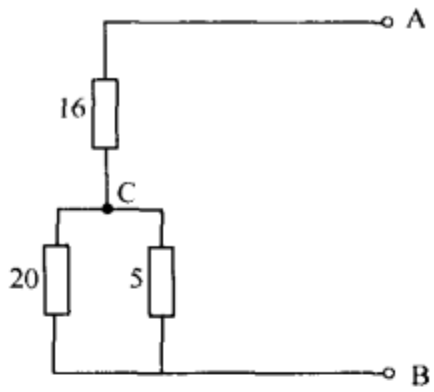


图 4-27　求除源二端网络的等效电阻

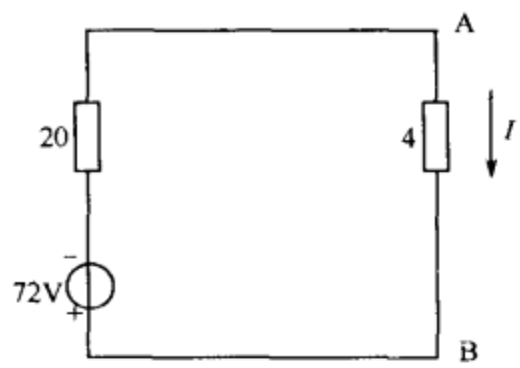


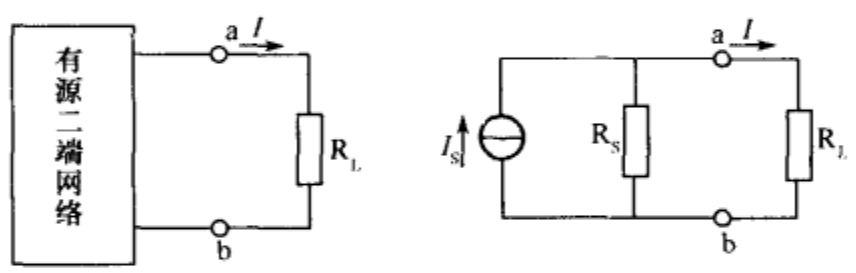
图 4-28　例 7 等效电压源

负号说明，电流的实际方向与参考方向相反。

＊三、诺顿定理

1. 诺顿定理

任何一个线性有源二端网络都可以用一个电流为 I_s 的理想电流源和内阻 R_s 并联的电源模型来等效代替。电流源的电流 I_s 等于二端网络端口短路时的短路电流，并联电阻等于线性有源二端网络除源（理想电压源短路，理想电流源开路）后所得到的无源网络 a、b 两端之间的等效电阻。这就是诺顿定理。如图 4-29 所示。



(a)　　(b)

图 4-29　诺顿定理等效电路

一个有源二端网络既可用戴维南定理化为等效电压源，也可用诺顿定理化为等效电流源，两者对外电路都是等效的。

2. 应用举例

例 8：如图 4-30 所示电路，用诺顿定理求电路中 4Ω 电阻上的电流。

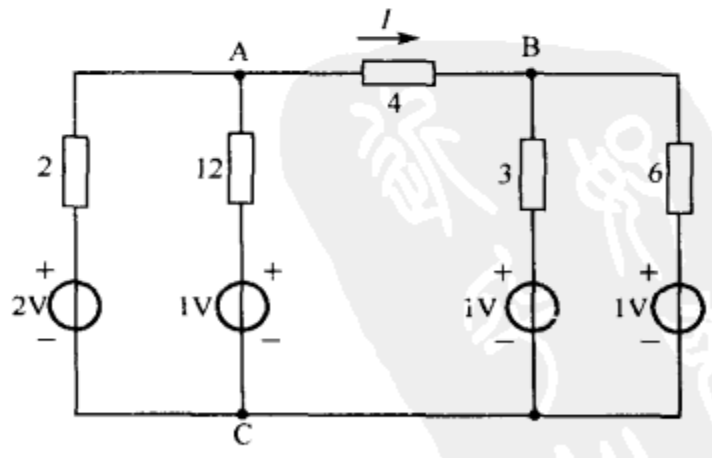


图 4-30　例 8 电路

解：①将 4Ω 电阻所在支路从电路中划分出来，如图 4-31 所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

②求短路电流 I_s。

将 AB 端用短路线短接，如图 4-32 所示。

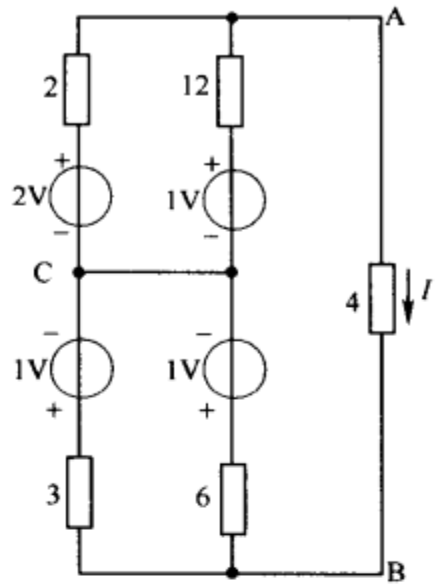


图 4-31　等效电路

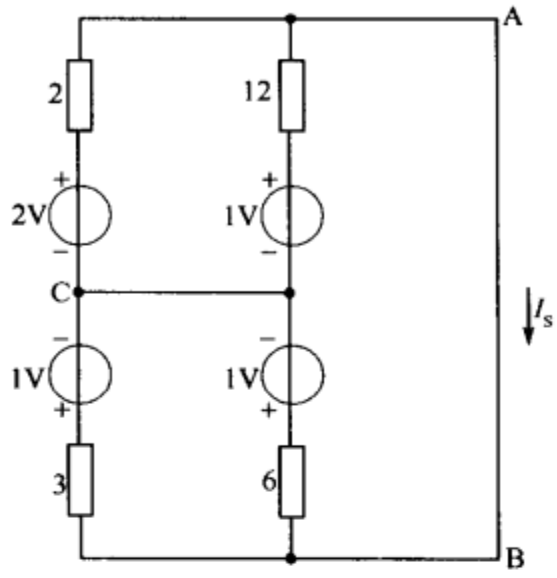


图 4-32　将 AB 端用短路线短接

将电压源变换为等效的电流源，如图 3-33 所示。

将并联的电流源合并，如图 4-34 所示。

将电流源再变换为电压源，如图 4-35 所示。

图 4-33　将电压源变换为等效的电流源

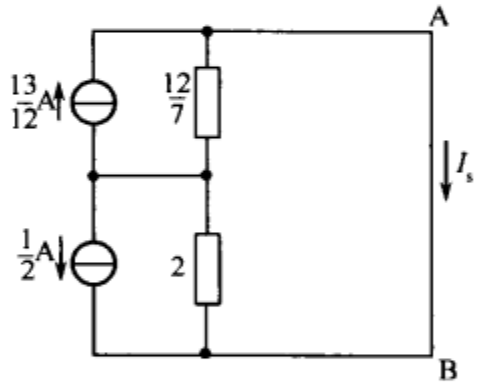


图 4-34　将并联的电流源合并

图 4-35　将电流源再变换为电压源

由此可得到短路电流为：

$$I_s=\frac{\frac{13}{7}-1}{2+\frac{12}{7}}=\frac{3}{13}(\mathrm{A})$$

③求除源二端网络的等效电阻。

含源二端网络中的各电压源用短路线代替，如图 4-36 所示。

由此可得到等效电阻为

$$R_s=R_{AB}=12//2+3//6=3\frac{5}{7}(\Omega)$$

④求 4Ω 电阻上的电流。

根据以上可得到等效电流源如图 4-37 所示。

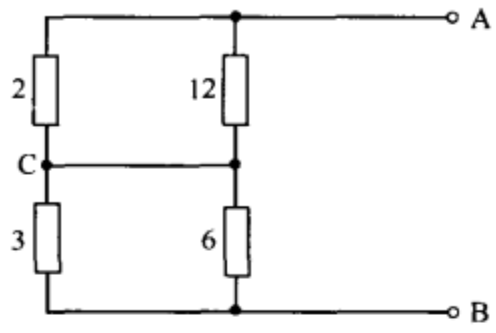


图 4-36　求除源二端网络的等效电阻

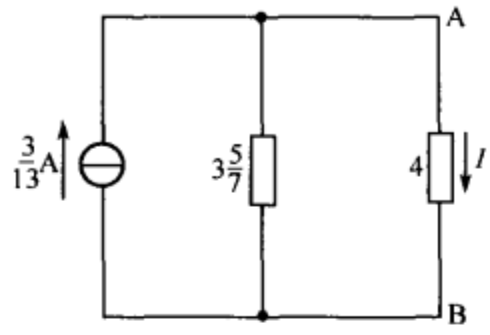


图 4-37　等效电流源

根据电阻的分流关系，可求出 4Ω 电阻上的电流 I 为：

$$I=\frac{\frac{3}{13}}{4+3\frac{5}{7}}=\frac{1}{9}(\mathrm{A})$$

* 第三节　非线性电阻电路的分析

如果电阻两端的电压与通过的电流成正比，这说明电阻是一个常数，不随电压或电流而变动，这种电阻称为线性电阻。线性电阻两端的电压与其中电流的关系遵循欧姆定律。

如果电阻不是一个常数，而是随着电压或者电流变动，那么，这种电阻就称为非线性电阻。非线性电阻两端的电压与其中电流的关系不遵循欧姆定律，一般不能用数学式表示，而是用电压与电流的关系曲线 $U=f(I)$ 或者 $I=f(U)$ 表示。这种曲线就是伏安特性曲线，一般是通过实验做出的。

非线性电阻在生产上应用很广，图 4-38 所示分别为白炽灯丝和半导体二极管的伏安特性曲线。图 4-39 是非线性电阻的符号。

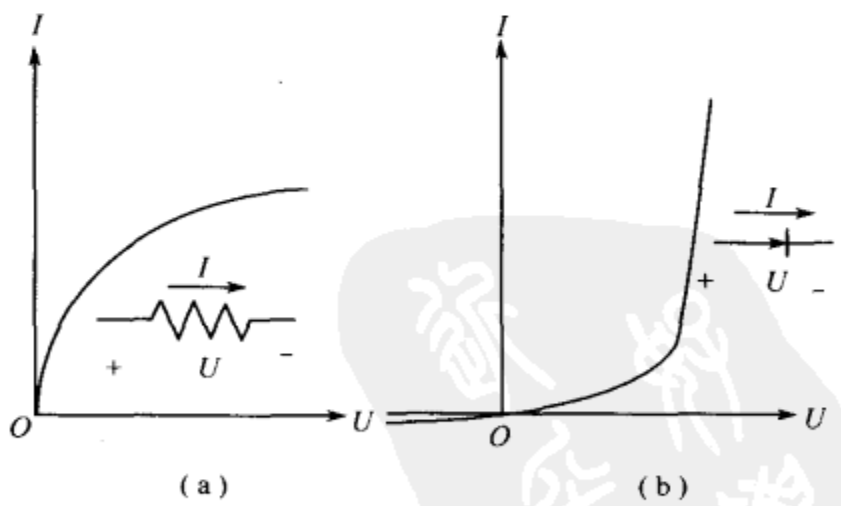


图 4-38　白炽灯丝和半导体二极管的伏安特性曲线

(a)白炽灯丝的伏安特性曲线；(b)半导体二极管的伏安特性曲线。

由于非线性电阻随电压或电流而变动，因此，计算它的阻值时就必须指出它的正确工作电流或电压。例如，在图 4-40 上，就是工作点 Q 处的电阻。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

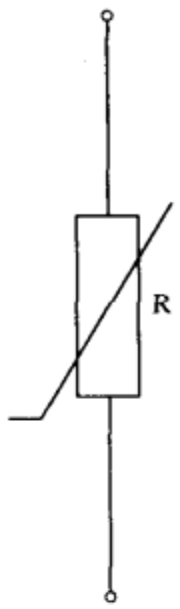


图 4-39　非线性电阻的符号

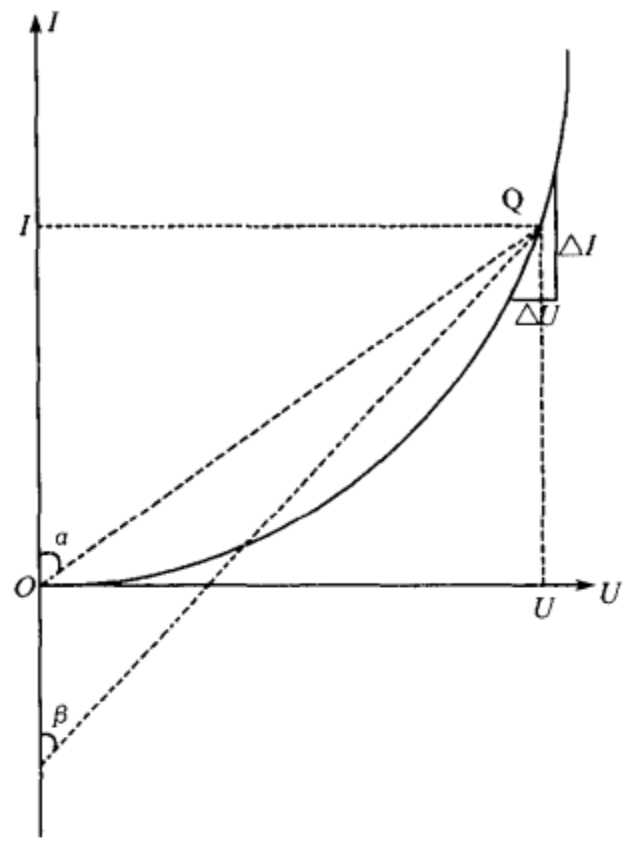


图 4-40　静态电阻和动态电阻

非线性电阻元件的电阻有两种表示方式：一种称为静态电阻(或称为直流电阻)，它等于工作点 Q 的电压 U 与 I 之比，即

$$R=\frac{U}{I}$$

Q 点的静态电阻正比于 tanα。

另一种称为动态电阻(或称为交流电阻)，它等于工作点 Q 附近的电压微变量 ΔU 与电流微变量 ΔI 之比的极限，即

$$r=\lim_{\Delta I\to 0}\frac{\Delta U}{\Delta I}$$

动态电阻用小写字母 r 表示，Q 点的动态电阻正比于 tanβ，β 是 Q 点的切线与纵轴的夹角。

由于非线性电阻电路的阻值不是常数，在分析与计算非线性电阻电路时，一般采用图解法。

例 9：在图 4-41(a)所示的电路中，$R_1=3\text{k}\Omega$，$R_2=1\text{k}\Omega$，$R_3=0.25\text{k}\Omega$，$U_1=5\text{V}$，$U_2=1\text{V}$。D 是半导体二极管，其伏安特性曲线如图 4-41(b)所示。用图解法求出二极管中的电流 I 及其两端的电压 U。

解：将二极管划出，其余部分是一个有源二端网络，可应用戴维南定理化为一个等效电源，如图 4-42 所示。

等效电源的电压 U_s 和内阻 R_s 可通过图 4-43 所示电路计算。

由图 4-43(a)计算 U_s：

$$I'=\frac{U_1-U_2}{R_1+R_2}=\frac{5-1}{3+1}=1(\text{mA})$$

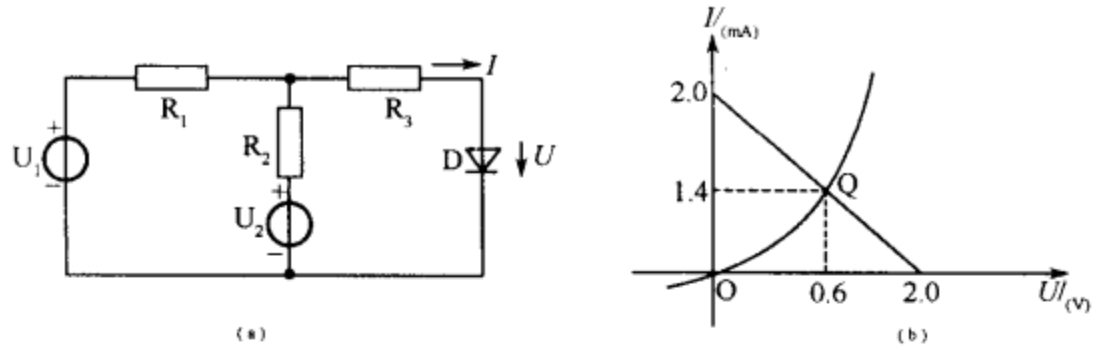


图 4-41　例 9 电路

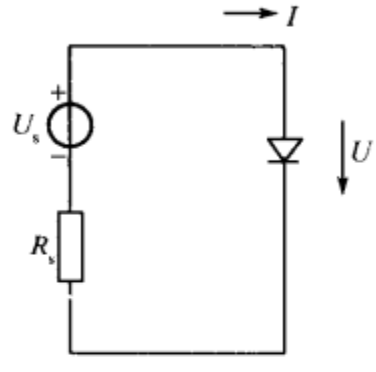


图 4-42　等效电路

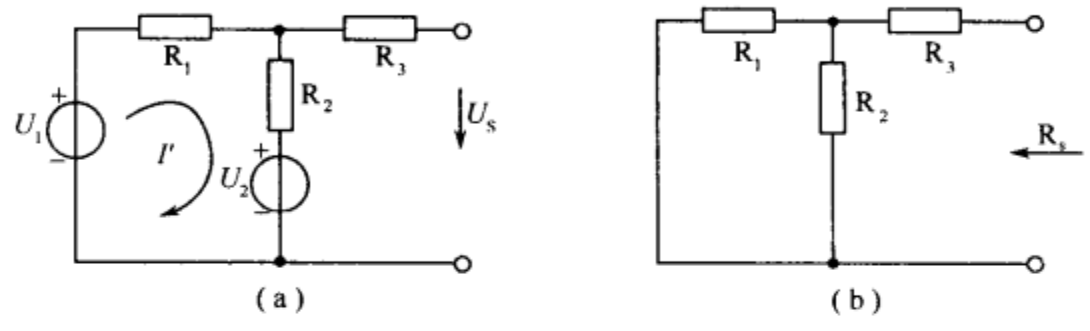


图 4-43　计算等效电源的电压和内阻

因此，$U_s=U_2+IR_2=1+1\times1=2(\mathrm{V})$

由图 4-44(b)计算 R_s：

$$R_s=R_3+\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=0.25+\frac{3\times1}{3+1}=1(\mathrm{k\Omega})$$

于是，由图 4-42 可列出：

$$U=U_s-IR_s$$

即 $U=2-I$

根据上式绘出直线，这条直线和二极管的伏安特性曲线交于 Q，由图可得

$$I=1.4\mathrm{mA},U=0.6\mathrm{V}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第五章　磁场与磁路基础知识

电和磁是两个互相联系不可分割的基本现象，现代几乎所有的电子设备都与电和磁有关，本章将主要阐述电和磁的基本知识，主要包括磁场和磁感线、安培力和磁感应强度、磁通量、法拉第电磁感应定律、楞次定律、自感现象、磁性材料的磁性能和磁路基本定律等内容。

第一节　磁场和磁感线

像电现象一样，磁现象也与人类有着密切的联系，现代社会生活离不开电动机、发电机、电话、电视机，以及电子计算机和各类电气仪表，这些都跟磁现象有关。磁现象跟电现象有着密不可分的联系，许多电现象都有磁现象伴随。

一、简单磁现象

磁铁能吸引铁、钴、镍等物质，磁铁的这种性质叫做磁性，具有磁性的物质叫做磁体。磁体各部分的磁性强弱不同，条形磁铁的两端磁性最强（如图 5-1 所示），磁体上磁性最强的部分叫做磁极。

在水平面内自由转动条形磁极或磁针，其静止后总是一个指南、一个指北，指南的磁极叫做 S 极（南极），指北的磁极叫做 N 极（北极），如图 5-2 所示。



图 5-1　条形磁铁两端磁性最强

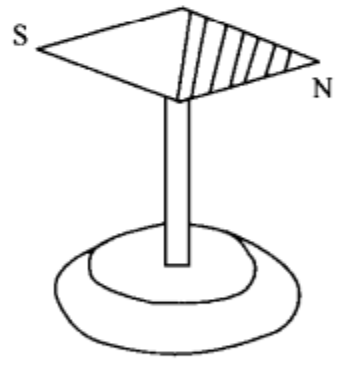


图 5-2　磁针指南北

磁体还具有一个重要的特性，即同名磁极互相排斥，异名磁极互相吸引，如图 5-3 所示。

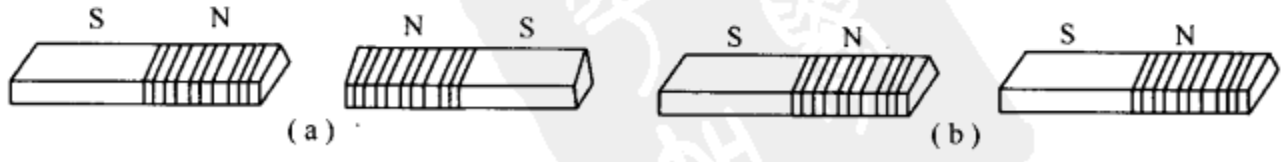


图 5-3　同名磁极互相排斥，异名磁极互相吸引

(a)互相排斥；(b)互相吸引。

二、磁体周围的磁场和磁感线

1. 磁体周围的磁场

先在桌上放一圈小磁针，再把一个条形磁体放到小磁针中间，如图 5-4 所示，会发现小磁针静止时都不再指南北，而有了新的指向。

这是因为在磁体周围存在着磁场，小磁针受到磁场的磁力作用，从而具有新的指向。磁场看不见、摸不到，但人们却可以根据它所表现出来的性质来认识它、研究它。磁场的基本性质是它对放入其中的磁体产生磁力作用，磁体间的相互作用就是通过磁场而发生的。

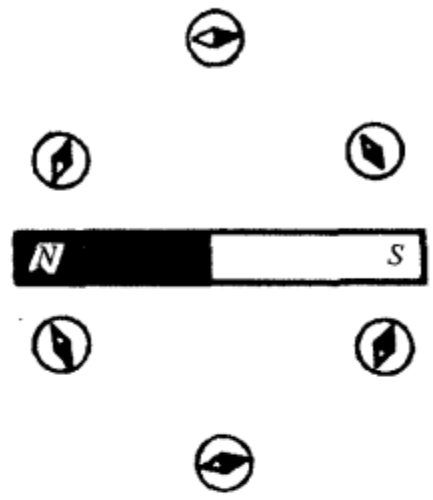


图 5-4　磁体周围存在磁场

在图 5-4 中，小磁针在磁场中停在一定方向，这显示出磁场的方向性。人们规定，在磁场中的某一点，小磁针静止时北极(N 极)所指的方向就是该点的磁场方向。

2. 磁感线

物理学家用磁感应线来形象地描述空间磁场的情况。在磁场中画一些有方向的曲线，任何一点的曲线方向都跟放在该点的磁针北极所指的方向一致，这样的曲线叫做磁感应线，简称磁感线。磁体周围的磁感线都是从磁体北极出来，回到磁体南极。如图 5-5 表示几种常见磁铁的磁感线分布。

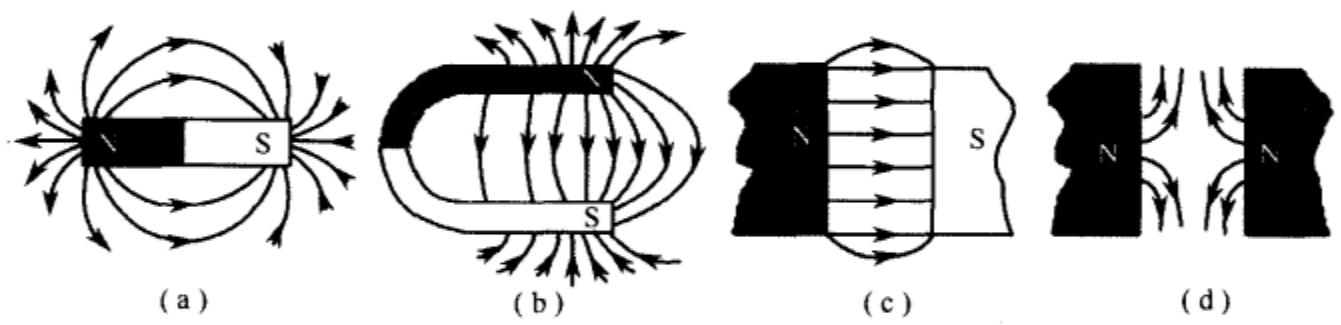


图 5-5　几种常见磁铁的磁感线分布

(a)条形磁铁的磁场；(b)蹄形磁铁的磁场；

(c)距离很近的异名磁极之间的磁场；(d)距离很近的同名磁极之间的磁场。

磁铁外部的磁感线是从磁铁的北极出来，进入磁铁的南极。那么磁铁内部有没有磁感线呢？回答是肯定的，磁铁内部磁感线方向由南极指向北极，并和外部的磁感线连接，形成闭合曲线。

例 1：如图 5-6 所示，把小磁针放在磁场中，磁场方向如图中箭头所示，小磁针将怎样转动？它将停在哪个方向？

解：小磁针北极受磁场力 $\boldsymbol{F}_1$ 的方向与磁场方向相同，南极受磁场力 $\boldsymbol{F}_2$ 的方向与磁场方向相反，如图 5-7(a)所示。在磁场力 $\boldsymbol{F}_1$ 和 $\boldsymbol{F}_2$ 的作用下，小磁针将沿顺时针方向转动，小磁针停止转动时北极所指的方向与磁场方向相同，如图 5-7(b)所示。这时磁场力 $\boldsymbol{F}_1$ 和 $\boldsymbol{F}_2$ 平衡。

三、电流的磁场和磁感线

1. 电流产生的磁场

磁体能够产生磁场，但它并不是磁场的唯一来源。早在 18 世纪就有人观察到闪电能

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

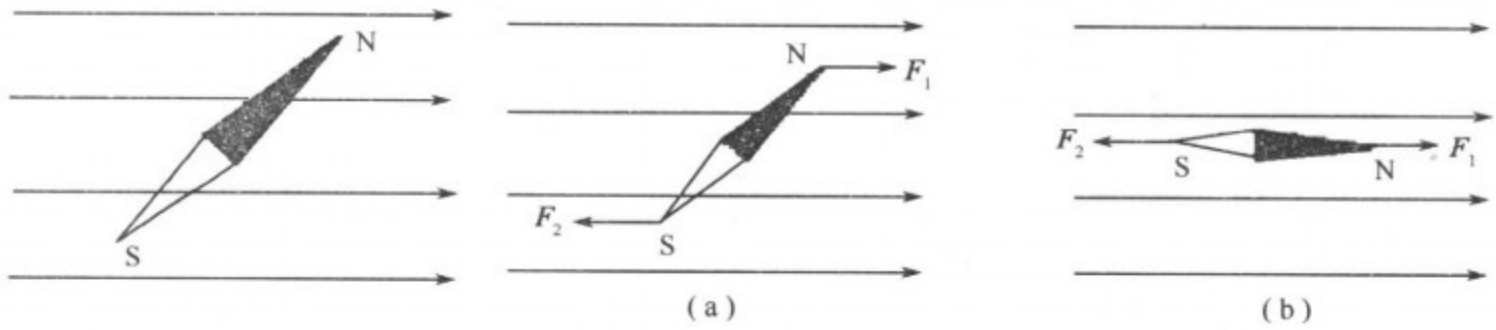


图 5-6　例 1 图

图 5-7　小磁针转动的方向

够使小刀、汤匙等钢铁制品变成磁体，这些偶然观察到的现象表明电与磁之间有着某种联系，但是当时人们并没有通过有目的的实验归纳出明确的结论。

1820 年，丹麦物理学家奥斯特(1777 年—1851 年)做了一个实验，把电磁学的研究向前推进了一大步，他把一条导线平行地放在磁针的上方，给导线通电时发现磁针发生偏转(见图 5-8)，就像在磁针旁边放上一块磁铁一样，这个实验说明电流也能产生磁场，电现象和磁现象有密切的联系。

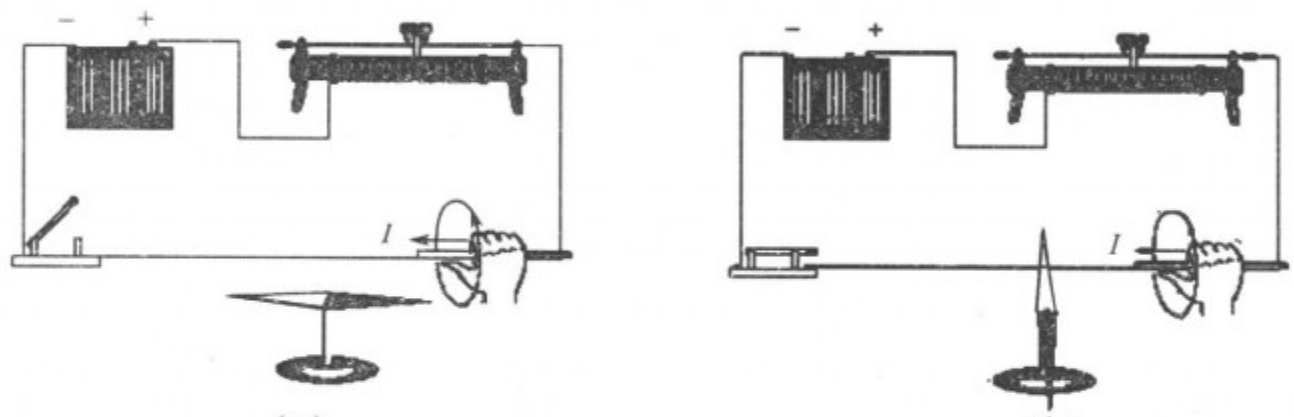


图 5-8　奥斯特实验

(a)开关合上前，磁针不偏转；(b)开关合上后，磁针偏转。

电流能够产生磁场，那么，磁场对通电导线是否会有某种作用？回答是肯定的。通过实验可以发现，若把一段直导线放在磁场里，当导线中通过电流时，导线会运动，这表明导线受到了力的作用。这说明，磁场不仅对永磁体有力的作用，对通电导线也有力的作用。

电流能够产生磁场，而磁场对通电导线又有力的作用，于是很自然地会想到，电流和电流之间也应该通过磁场发生相互作用，这可以用实验来验证这一猜想。有互相平行而且距离较近的两条导线，当导线中分别通以方向相同、方向相反的电流时，观察发生的现象。

实验表明，当电流方向相同时，导线相互靠近；当电流方向相反时，导线相互远离。这时每条通电导线都处在另一条导线中的电流产生的磁场里，因而受到磁场力的作用，这就是说，电流和电流之间，也会通过磁场发生相互作用。

综上所述，可以得知：磁极和电流都能在空间产生磁场，而磁场对它里面的磁极和通电导线有力的作用。这样，就对磁极和磁极之间、磁极和电流之间、电流和电流之间的相互作用获得了统一的认识，所有这些相互作用都是通过同一种场——磁场来传递的。

2. 直线电流磁场的磁感线和安培定则

图 5-9(a)表示直线电流磁场的磁感线分布，这些磁感线是一些同心圆，同心圆环绕着通电直导线。实验表明，如果改变电流的方向，各点磁场的方向都变成相反的方向。也就是说，磁感线的方向随电流的方向而改变。

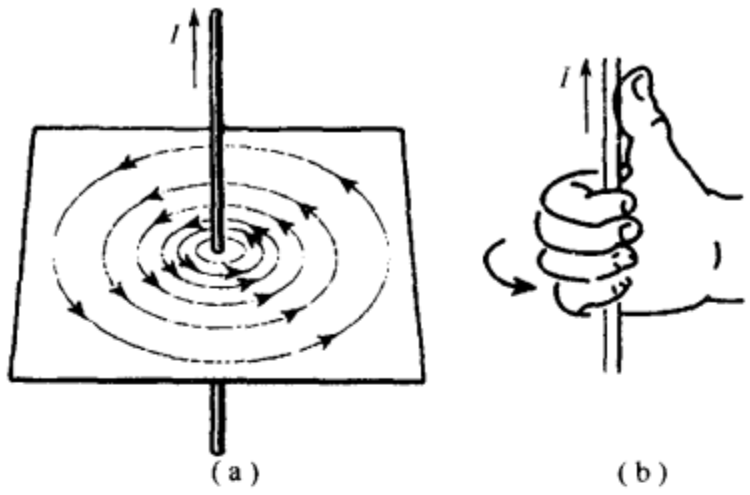


图 5-9　直流电流的磁感线

(a)磁感线分布；(b)安培定则。

直线电流的方向跟磁感线方向之间的关系可以用安培定则(也叫右手螺旋定则)来判定：用右手握住导线，让伸直的拇指所指的方向跟电流的方向一致，弯曲的四指所指的方向就是磁感线的环绕方向，如图 5-9(b)所示。

3. 环形电流磁场的磁感线

流过环形导线的电流简称环形电流，图 5-10(a)表示环形电流磁场的磁感线分布。可以看出，环形电流的磁感线也是一些闭合曲线，这些闭合曲线也环绕着通电导线，环形电流的磁感线方向也随电流的方向而改变。

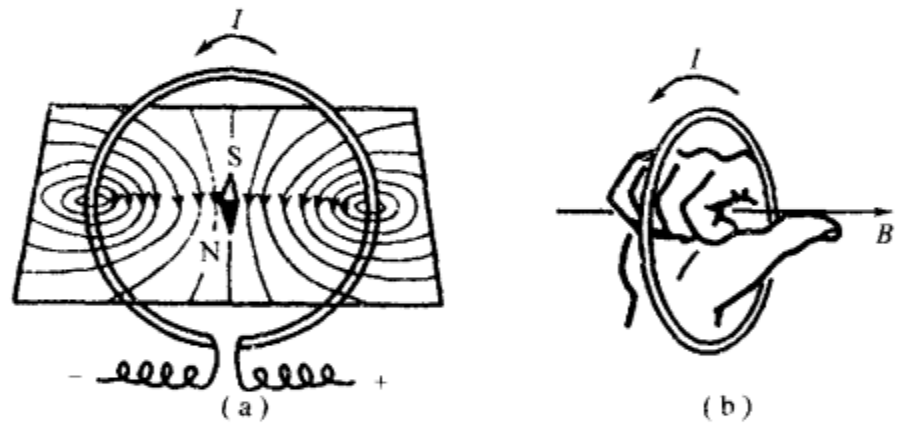


图 5-10　环形电流磁场的磁感线

(a)磁感线分布；(b)安培定则。

研究环形电流的磁场时，人们主要关心圆环轴线上各点的磁场方向，这可以用安培定则来判定：让右手弯曲的四指和环形电流的方向一致，伸直的拇指所指的方向就是圆环的轴线上磁感线的方向，如图 5-10(b)所示。

4. 通电螺线管磁场的磁感线

螺线管是由导线一圈圈地绕成的，导线外面涂着绝缘层，因此电流不会由一圈跳到另一圈，只能沿着导线流动，这种导线叫做绝缘导线。通电螺线管可以看成是放在一起的许多通电环形导线，人们自然会想到二者的磁场分布也一定是相似的，实际上也的确如此。前面讲到的环形电流，其实可以看作是只有一匝的螺线管。

螺线管通电以后表现出来的磁性，很像是一根条形磁铁，一端相当于北极，另一端相当于南极，改变电流的方向，它的南北极就对调。通电螺线管外部的磁感线和条形磁铁外部的磁感线相似，也是从北极出来，进入南极；通电螺线管内部具有磁场，内部的磁感线跟螺线管的轴线平行，方向由南极指向北极，并和外部的磁感线连接，形成一些环绕电流的

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

闭合曲线。通电螺线管的电流方向跟它的磁感线方向之间的关系，也可用安培定则来判定：用右手握住螺线管，让弯曲的四指所指的方向与电流的方向一致，大拇指所指的方向就是螺线管内部磁感线的方向。也就是说，大拇指指向通电螺线管的北极。图 5-11 画出了通电螺线管的磁感线。

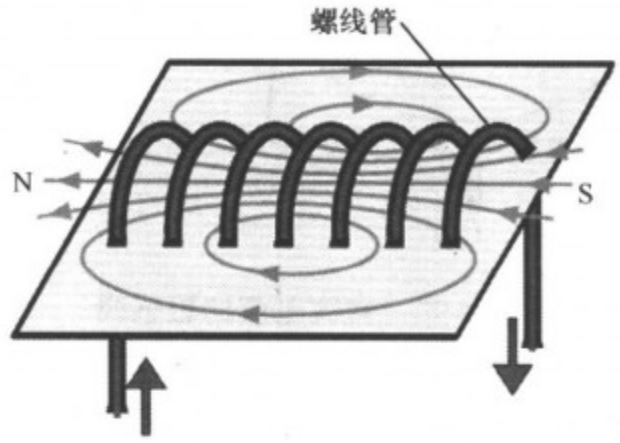


图 5-11　螺线管的磁感线

从上面分析可知，与天然磁铁相比，电流磁场具有容易调节和控制的特点，因而在实际中有很多重要的应用。电磁起重机、电话、电动机、发电机，以及在自动控制中得到普遍应用的电磁继电器等，都离不开电流的磁场。

5. 电流和磁场的方向表示法

为了绘图方便，常用“⊙”表示电流垂直纸面向外，用“⊗”表示电流垂直纸面向里；用“×”表示磁感线方向垂直纸面向里，用“·”表示磁感线方向垂直纸面向外。图 5-12 表示直线电流磁场的几种不同画法。

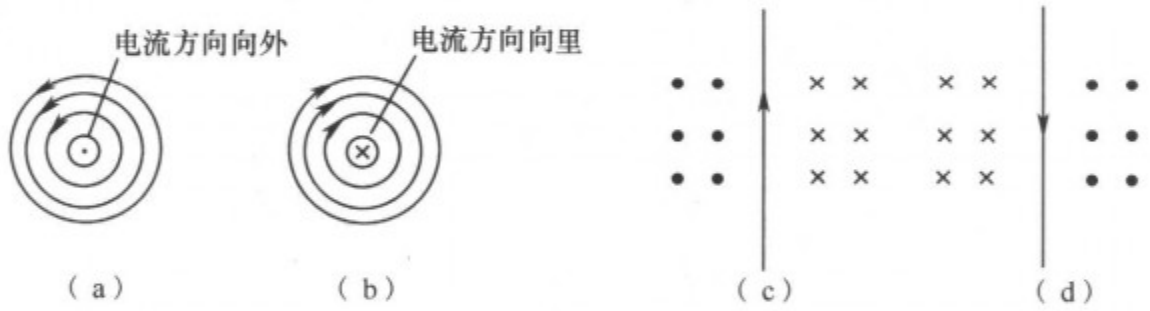


图 5-12　直线电流磁场的几种不同画法

例 2：如图 5-13 所示，当电流通过线圈时，磁针的南极指向读者，试确定线圈中电流的方向。

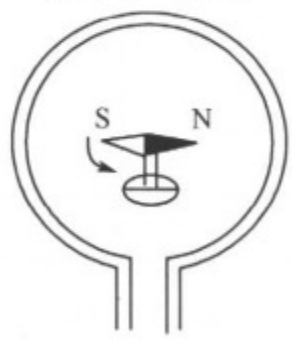


图 5-13　例 2 图

解：磁针南极指向读者，说明磁针所在处的磁场方向远离读者。根据安培定则可知，线圈中的电流方向是顺时针的。

例 3：如图 5-14(a)所示，试确定电源的正极和负极。

解：根据图中磁针北极的指向可知，螺线管内部的磁场方向由右向左，再根据安培定则可判断出螺线管中电流方向，由电流方向可知电源右端为正极，左端为负极，如图 5-14(b)所示。

例 4：如图 5-15(a)所示，当合上开关后，试确定小磁针的偏转方向。

解：当开关闭合时，电流流过螺线管，螺线管内就产生磁场，螺线管的左端相当于 N 极，右端相当于 S 极。在螺线管的外部，磁感线方向从 N 极流向 S 极，于是小磁针就在磁场的作用下发生偏转，偏转方向如图 5-15(b)中所示，即小磁针的 N 极指向右，与外部磁感线方向一致。

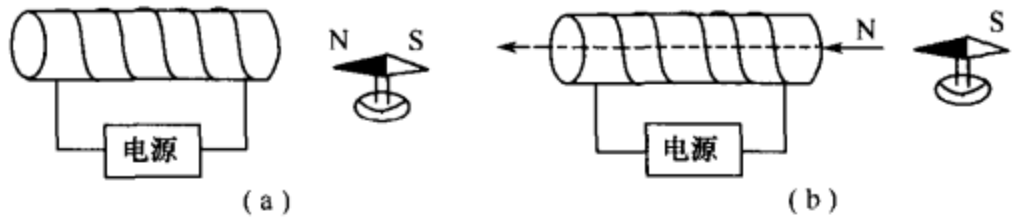


图 5-14　例 3 电路

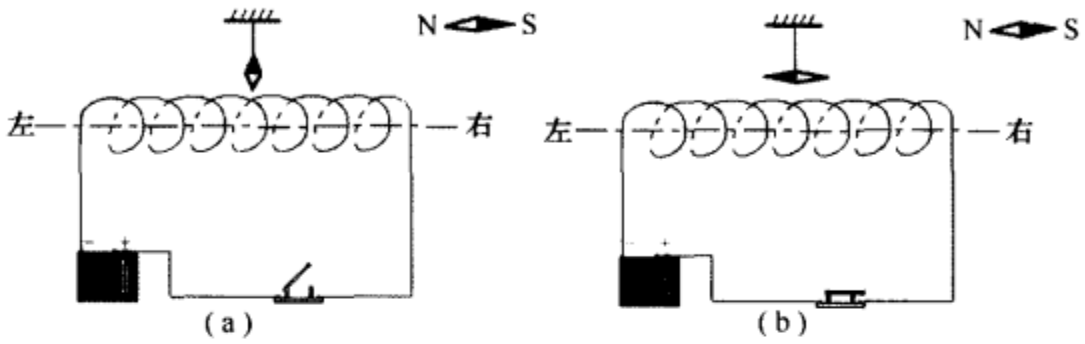


图 5-15　小磁针在螺线管的上方

(a)开关合上前；(b)开关合上后。

同理，当小磁针在螺线管的下部时，如图 5-16(a)所示，合上开关后，小磁针也指向右，如图 5-16(b)所示。

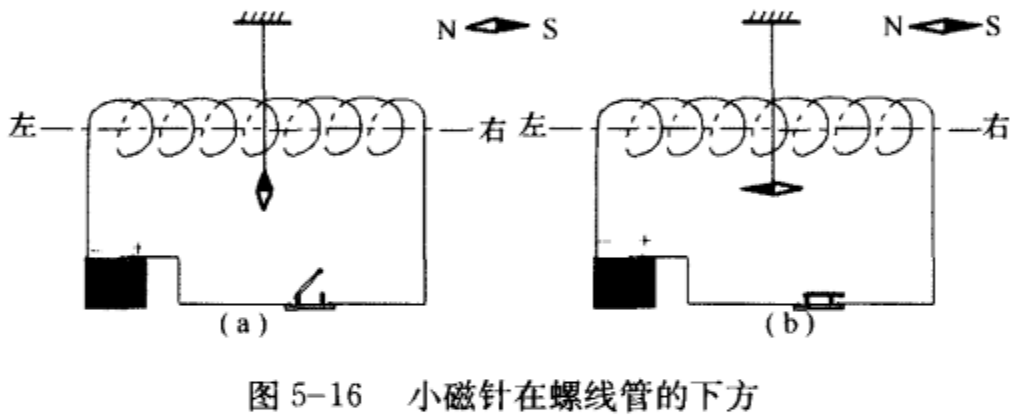


图 5-16　小磁针在螺线管的下方

(a)合上开关前；(b)合上开关后。

需要说明的是，当小磁针在螺线管中间时，合上开关后，小磁针的偏转方向则指向左，因为在螺线管内部，磁感线方向由右指向左，即由 S 极指向 N 极，如图 5-17 所示。

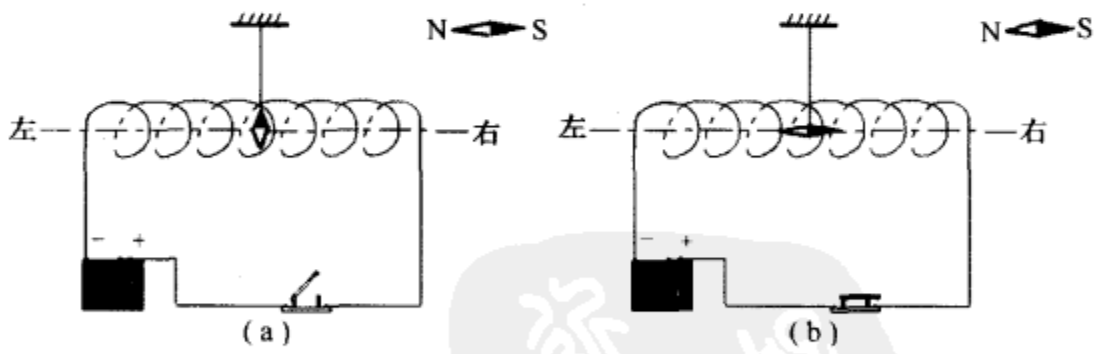


图 5-17　小磁针在螺线管中间

(a)合上开关前；(b)合上开关后。

四、地磁场

一个能在水平面内自由转动的磁针，静止时北极指北，南极指南，世界各地基本如此，这是因为地球本身是一个巨大的磁体，地磁北极在地理南极附近，地磁南极在地理北极附近。在地球周围的空间里存在着磁场，叫做地磁场，地磁场的磁感线从地理的南极(地磁北极)出发，到地理北极(地磁南极)，并且两极磁性最强，磁感线几乎垂直于地面，赤道处

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

磁感线与地面平行，如图 5-18 所示。磁针指南北，就是因为受到地磁场的作用。

由于地理两极跟地磁两极并不重合，所以磁针所指的南北方向不是地理的正南正北方向，而是稍微有些偏离，我国宋代学者沈括(1030 年—1095 年)是世界上最早准确记述这一现象的人。

五、磁场的应用

用小磁针探查通用螺线管的磁场，发现当螺线管内插入铁芯时，由于铁芯被磁化，磁场大大增强。因此，人们在希望利用通电螺线管得到强磁场时，一般都要把螺线管紧密地套在一个铁芯上，这样就构成了一个电磁铁，如图 5-19 所示。

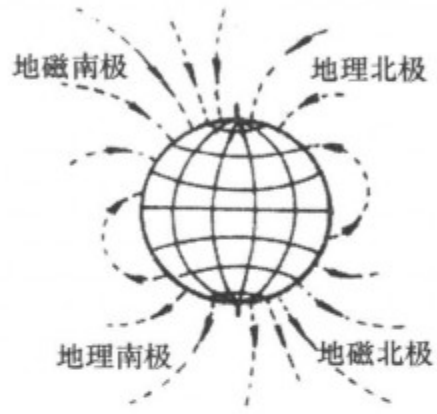


图 5-18　地磁场

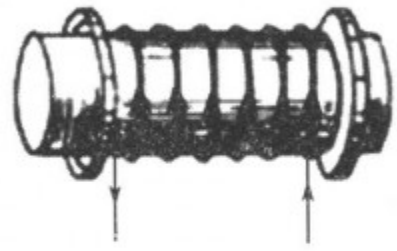


图 5-19　电磁铁

通过研究电磁铁可以知道：电磁铁的磁性有无可以由通断电来控制，电磁铁的磁性强弱可以由电流的强弱来控制。电磁继电器就是利用电磁铁的这一特点来工作的。

实际的工业生产中，很多高压电路需要人为控制，但是，人直接操作高压电路的开关是很危险的，因此人们希望通过控制低压电路的通断间接地控制高压电路的通断。利用电磁铁制成的电磁继电器，可以解决这个问题。电路包括高压工作电路和低压控制电路，还有将两电路连接起来的电磁继电器，如图 5-20 所示。

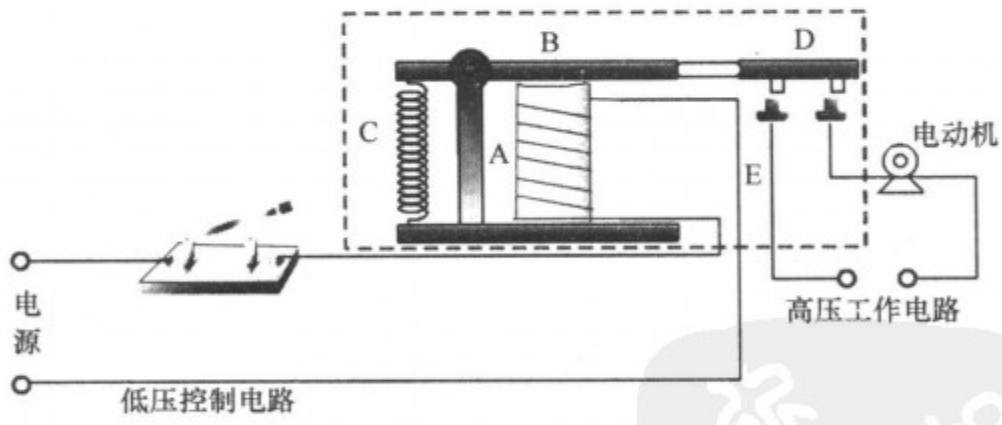


图 5-20　电磁继电器控制电路

A—电磁铁；B—衔铁；C—弹簧；D—动触点；E—静触点。

图 5-20 中的虚线部分是电磁继电器的结构示意图，主要包括：电磁铁、衔铁、弹簧、动触点和静触点，静触点是连在高压工作电路中的。

电磁继电器的工作原理是这样的：当电磁铁通电时，就有了磁性，这样，它就可以把上面的衔铁 B 吸引下来，同时，弹簧 C 拉伸，动触点 D 和静触点 E 接触，整个工作电路闭合。电磁铁断电时，它就失去磁性，弹簧把衔铁拉起来，使动触点与静触点脱开，从而切断了高压部分的工作电路。可见，电磁继电器就是利用电磁铁来控制工作电路的开关。

第二节　安培力和磁感应强度

磁场不仅具有方向性，而且有强弱的不同。巨大的电磁铁能吸起成吨的钢铁，小磁铁只能吸起小铁钉。就是同一块磁铁，两极附近的磁场也比其他部位的磁场强。对于电流产生磁场的情况，电流越大，产生的磁场越强，那么，怎样表示磁场的强弱呢？

磁场的基本特性是对其中的通电导线有作用力，要寻求表示磁场强弱的物理量，首先要研究这种力，磁场对通电导线的作用力通常称为安培力，这是为了纪念法国物理学家安培（1775 年—1836 年），他在磁场力的研究上做出了杰出贡献。

一、安培力的大小和磁感应强度

实验表明：把一段通电直导线 L 放在磁场里，当导线方向与磁场方向垂直时（见图 5-21(a)），导线所受的安培力最大；当导线方向与磁场方向一致时（见图 5-21(b)），它所受的安培力等于零；当导线方向与磁场方向斜交成 θ 角时（图 5-21(c)），安培力介于最大值和零之间。

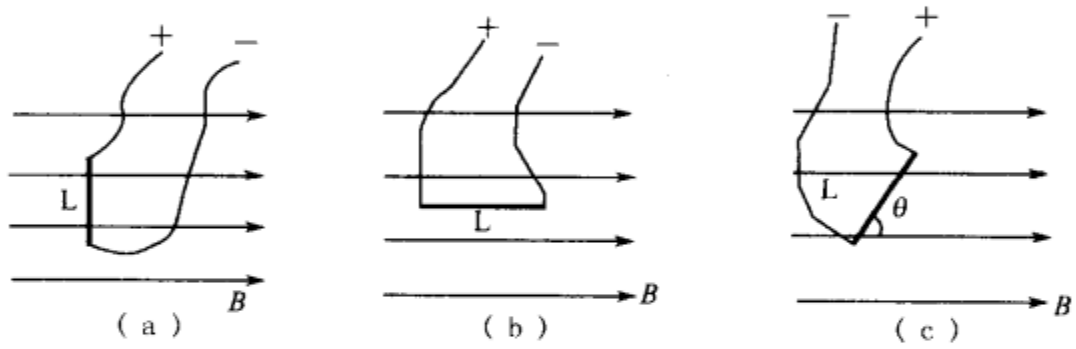


图 5-21　通电导线在磁场中

当导线方向与磁场方向垂直时，通电导线所受的安培力 F 跟电流 I 和导线长度 L 成正比，写成公式就是：

$$F=BIL \tag{5-1}$$

其中 B 是比例系数，对于确定的磁场中的一个确定点来说，B 是个常量。式(5-1)也可以写成：

$$B=\frac{F}{IL} \tag{5-2}$$

实验发现，在同一磁场中的同一个位置，不管电流 I、导线长度 L 怎样改变，比值 B 总是确定的；但在不同的磁场中，或在磁场的不同位置，一般说来 B 是不同的。比值 B 越大，在 I 和 L 一定的情况，通电导线受到的安培力 F 越大，表示磁场越强，因此，可以用比值 B 来描述磁场的强弱，叫做磁感应强度。

在上面的实验中，导线所在处的磁场强弱可以认为处处相同。然而，一般说来空间各点磁场的强弱不一定相同，例如磁极附近的磁场总比其他位置的磁场强，这时可以设想用很短的一段通电导线进行实验．这样就可以用 B 表示某点的磁场强弱，称为该点的磁感应强度。

在国际单位制中，磁感应强度的单位是特斯拉，简称特，符号是 T。当通电导线与磁

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

场垂直时，如果电流 $I=1A$，导线长 $L=1m$，而且这段导线受的安培力恰为 $F=1N$（牛），那么从式(5-2)可以看到：

$$1T=1N/(A\cdot m)$$

永磁铁磁极附近的磁感应强度大约为 $10^{-3}T$；在电机和变压器的铁芯中，磁感应强度可达 0.8T～1.4T；超导材料中的强电流产生的磁感应强度可高达 1000T；地面附近地磁场的磁感应强度只有 $3\times10^{-5}T\sim7\times10^{-5}T$。

磁感应强度是矢量，某点的磁场方向就是这点磁感应强度的方向。

在磁场中也可以用磁感线的疏密程度大致表示磁感应强度的大小。在同一个磁场的磁感线分布图上，磁感线越密的地方，磁感应强度越大。

如果在磁场的某一区域里，磁感应强度的大小和方向处处相同，这个区域的磁场就称为匀强磁场，也叫均匀磁场。匀强磁场是最简单但又很重要的磁场，在电磁仪器中有重要的应用，前面介绍的距离很近的异名磁极之间的磁场、通电螺线管内部的磁场，除边缘附近外都可以认为是匀强磁场。

引入了磁感应强度的概念后，式(5-1)$F=BIL$ 就可以表示为：在匀强磁场中，当通电导线与磁场方向垂直时，电流所受的安培力 F 等于磁感应强度 B、电流 I 和导线长度 L 三者的乘积。

在非匀强磁场中，公式 $F=BIL$ 适用于很短的一段通电导线。这是因为导线很短时，它所在处各点的磁感应强度的差别很小，可以近似地认为磁场是均匀的。

以上讨论了通电直导线与磁感应强度方向垂直时的情况，当通电直导线与磁感应强度方向之间的夹角为 θ 时，此时 B 可分解为两个分量，一个为水平分量 $B\cos\theta$，另一个为垂直分量 $B\sin\theta$，水平分量对电流的作用力为零，因此，安培力完全由垂直分量 $B\sin\theta$ 决定，此时，安培力的大小为：

$$F=BIL\sin\theta \tag{5-3}$$

二、安培力的方向和左手定则

实验证明，安培力的方向既与磁场方向垂直，又与通电导线的方向垂直。也就是说，安培力的方向总是垂直于磁感线和通电导线所在的平面。

通电直导线所受安培力的方向，与磁场方向、电流方向之间的关系可以用左手定则来判断：伸开左手，使拇指与四指在同一个平面内并与四指垂直，让磁感线垂直穿入手心，使四指指向电流的方向，这时拇指所指的方向就是导线所受安培力的方向，如图 5-22 所示。

例 5：如图 5-23 所示，垂直折线 abc 中通入 I 的电流，求通电导线的受力情况。

解：图 5-23(a)中，ab=bc=L，折线所在平面与匀强磁感强度 B 垂直，abc 受安培力等效于 ac(通有 a→c 的电流 I)所受安培力，即 $F=BI\cdot\sqrt{2}L$，方向可由左手定则进行判定，为在纸面内垂直于 ac 斜向上。

同理可知，图 5-23(b)中，半圆形通电导线受安培力 $F=BI\cdot2R$，受力方向如图。

如图 5-23(c)中，闭合的通电导线框受安培力 $F=0$。

例 6：如图 5-24(a)所示，把一通电直导线放在蹄形磁铁磁极的正上方，导线可以自由移动，当导线通过电流 I 时，导线怎样运动(从上往下看)？

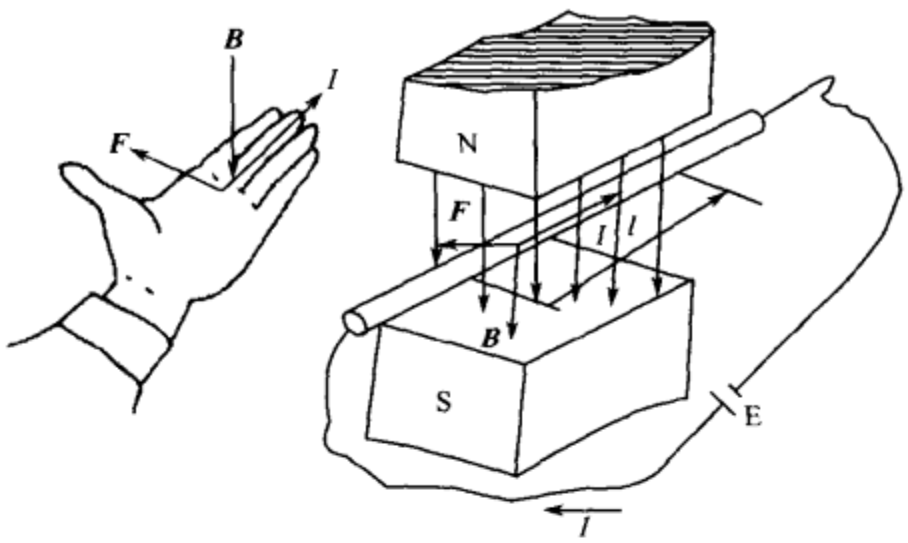


图 5-22　左手定则

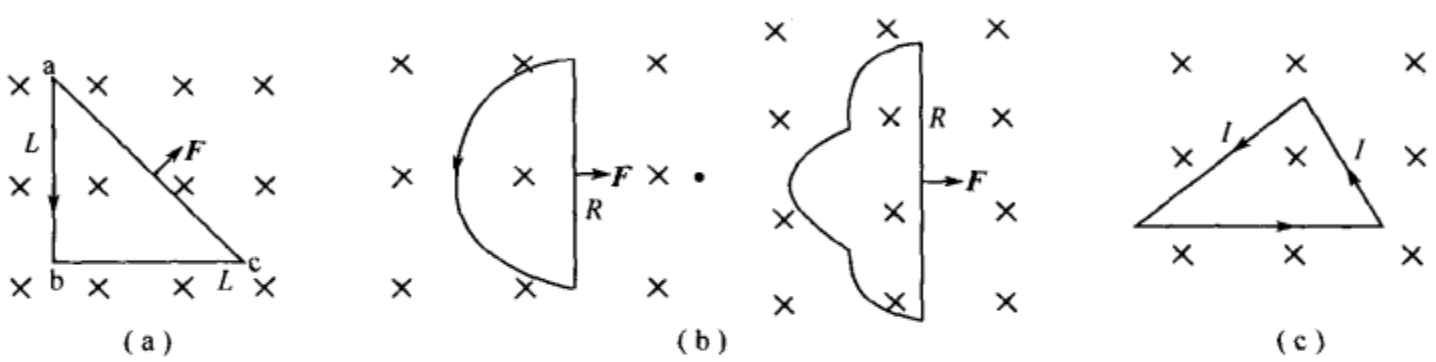


图 5-23　例 5 图

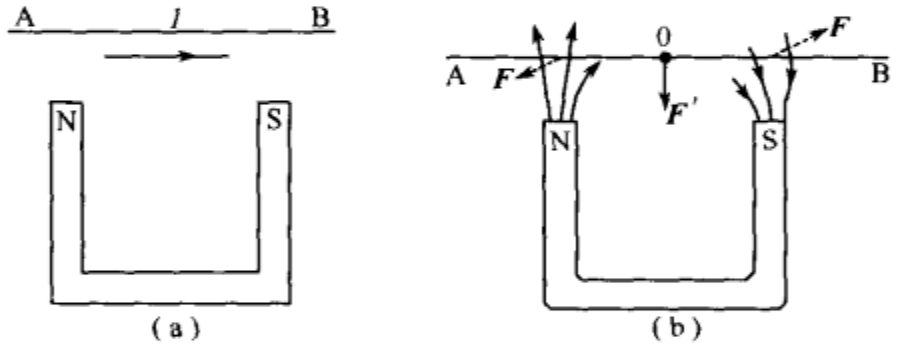


图 5-24　例 6 图

解：①电流元受力分析法：把直线电流等效为 AO、BO 两段电流元，蹄形磁铁磁感线分布以及两段电流元受安培力方向如图 5-24(b)所示。可见，导线将逆时针转动。

②特殊值分析法：设导线转过 90°到与纸面垂直的位置，判得安培力方向向下，故导线在逆时针转动的同时向下运动。

根据以上分析可知，导线逆时针方向转动，同时下降。

例 7：如图 5-25 所示，一根长度为 L，质量为 m 的导线 AB，用软导线悬挂在磁场强度为 $\boldsymbol{B}$ 的均匀磁场中，现要使悬线张力为零，则 AB 导线通电方向怎样？电流强度是多大？

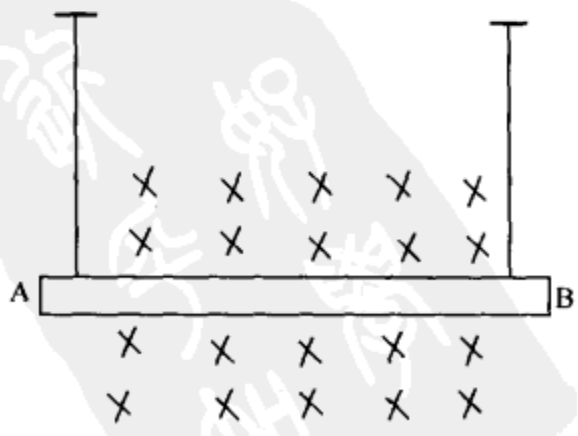


图 5-25　例 7 图

解：要使悬线张力为零，AB 导线受到的磁场力必须是向上，由左手定则可判断出电流方向是由 A

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

到 B。

设悬线张力刚好为零，由两力平衡得：

$$ILB=mg，所以\ I=mg/LB$$

例 8：如图 5-26(a)所示，两根靠近的平行直导线，通以方向相同的电流时，它们之间作用力的方向如何？

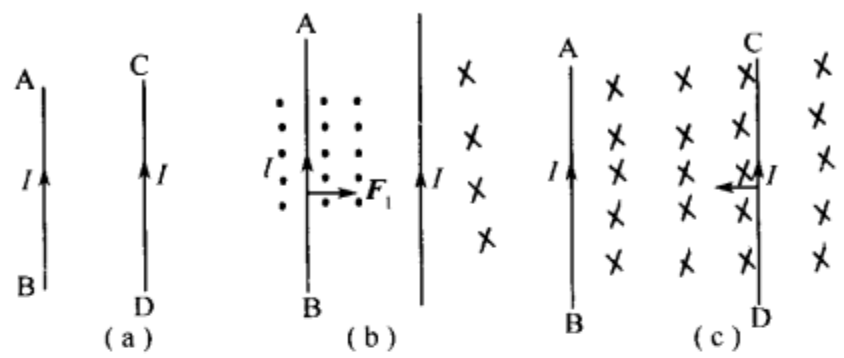


图 5-26　例 8 图

解：两根电流之间的相互作用力是通过电流产生的磁场而作用的，要分析 AB 受力，必须根据右手螺旋定则(安培定则)先画出 CD 产生的磁场方向，由左手定则可判知 AB 受到的磁场力指向 CD，如图 5-26(b)所示，用同样的方法先画出 AB 产生的磁场，再判断 CD 受到的磁场力方向指向 AB，如图 5-26(c)所示，因而两同向电流是相互吸引的。

例 9：如图 5-27 所示，两根细导线相互垂直且紧贴在一起，但彼此绝缘放在同一平面内，把 AB 固定，则通电后 CD 将怎样运动？

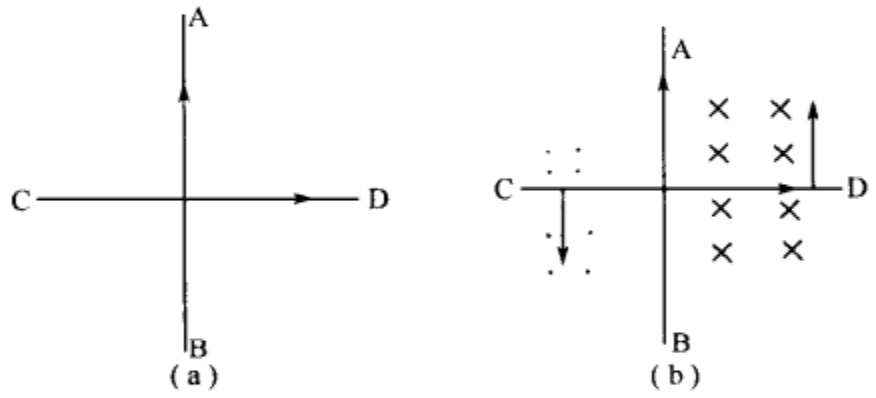


图 5-27　例 9 图

解：CD 受到的磁场力就是 AB 产生的磁场对 CD 的作用力，AB 产生的磁场如图 5-27(b)所示，由左手定则可知，CD 的左半段和右半段所受力如图 5-27(b)所示，因而，CD 将逆时针转动，即交叉电流要转到同方向。

方法技巧：判定安培力作用下物体运动方向的常用方法

①电流元受力分析法：即把整段电流等效为很多段直线电流元，先用左手定则判定出每小段电流元受安培力方向，从而判定出整段电流所受合力方向，最后确定运动方向。

②特殊值分析法：把电流或磁铁转到一个便于分析的特殊位置(如转过 90°)后再判定所受安培力方向，从而确定运动方向。

③等效分析法：环形电流可以等效成条形磁铁，条形磁铁也可以等效成环形电流，通电螺线管可等效成很多的环形电流来分析。

④推论分析法：a. 两电流相互平行时无转动趋势，方向相同相互吸引，方向相反相互排斥。b. 两电流不平行时有转动到相互平行且方向相同的趋势。

例 10：如图 5-28 表示一条放在磁场里的通电直导线，导线与磁场方向垂直。图中已经分别标明电流、磁感应强度和安培力这三个物理量中两个的方向，试标明第三个量的方向。

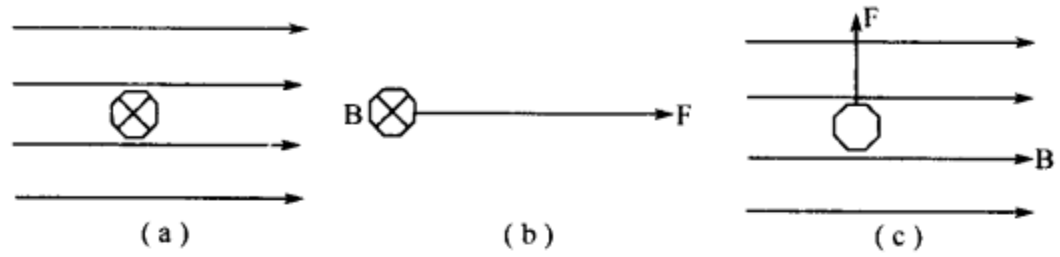


图 5-28　例 10 图

解：根据左手定则，判定答案如图 5-29 所示。

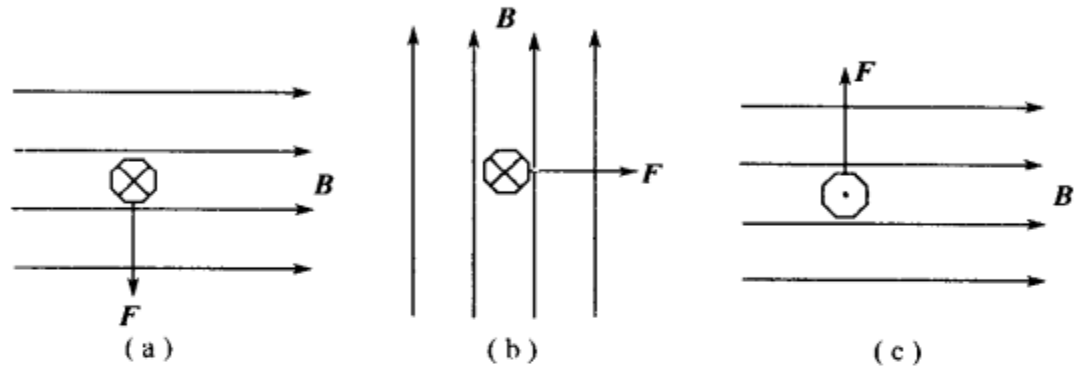


图 5-29　例 10 答案

例 11：判断图 5-30 所示图中导线所受安培力的方向。

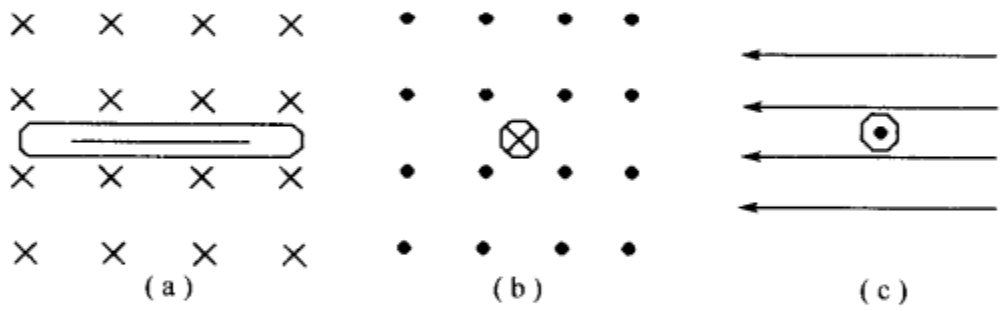


图 5-30　例 11 图

解：图 5-30(a)中导线所受安培力竖直向下，图 5-30(b)中导线不受安培力，图 5-30(c)中导线所受安培力竖直向下。

例 12：在赤道上，地磁场可看作是沿南北方向并且与地面平行的匀强磁场，磁感应强度是 5×10^{-5}T，如果赤道上有一条沿东西方向的直导线，长 20m，载有从东向西的电流 30A，地磁场对这根导线的作用力有多大？方向如何？

解：根据安培力公式 $F=ILB$

有　　$F=30\times20\times5\times10^{-5}=3.0\times10^{-2}$(N)

即地磁场对这根导线的作用力是 3.0×10^{-2}N。

根据左手定则，可判断出作用力的方向垂直指向地面。

通过计算发现，虽然地磁场很弱，但由于导线比较长，通过的电流又比较大，安培力并不算小。

三、安培力的应用

1. 电流表

人们平常使用的电流表是磁电式电流表，电流流过电表中的线圈，线圈中的导线在磁

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

场中受力，电流越大，所受安培力越大，指针也就偏转得越多，磁电式电流表就是按照这个原理指示电流大小的。

磁电式电流表的构造如图 5-31(a)所示。有一个很强的蹄形磁铁，两极的形状比较特殊，其间又放置一块圆柱形的软铁，使得缝隙中的磁感线沿半径分布，如图 5-31(b)所示。一个铝框套在圆柱形软铁上，可以绕轴转动，铝框上绕着线圈，当电流通过时，线圈受到安培力的作用，带动指针偏转，连在转动轴上的两个螺旋弹簧阻碍线圈的转动，使得线圈转到一定位置后会停下来。由于磁感线沿半径分布，所以无论线圈转到什么位置，导线都和磁感线垂直。

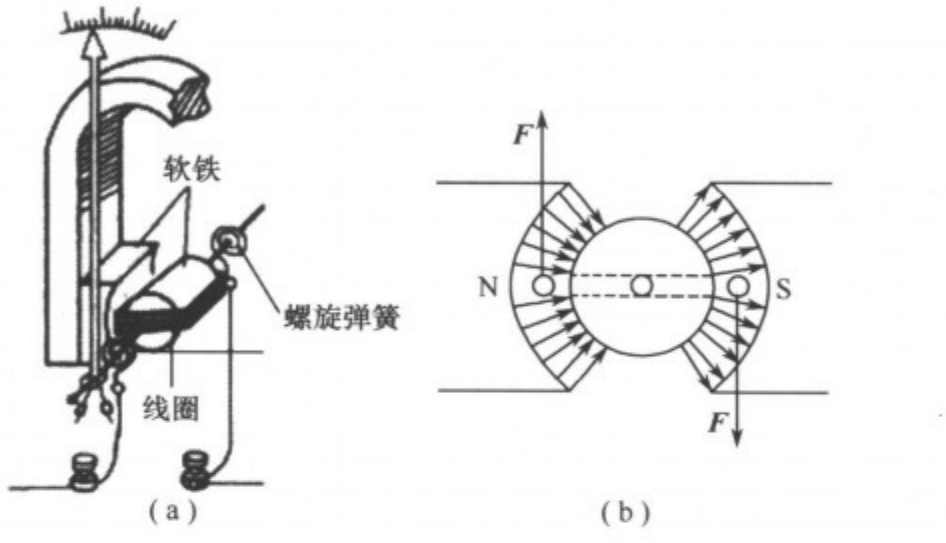


图 5-31　磁电式电流表的构成和磁场分布

线圈偏转的角度反映了线圈所受的安培力，从而代表了被测电流的强弱。

当线圈中的电流方向改变时，安培力的方向随之改变，指针的偏转方向也就改变。所以，如果把电流表两个接线柱上的导线对调，指针会向另一个方向偏转。

磁电式电流表的优点是灵敏度高，可以测出很弱的电流；缺点是绕制线圈的导线很细，允许通过的电流很弱，只有几十微安到几毫安，电流超过允许值时很容易烧坏，这一点一定要特别注意。实际使用中的电流表有的可以测量几安培甚至更大的电流，那是经过改装的。

阅读材料：电流表和电压表

实验中使用的电压表和电流表，实际是由表头和电阻串联或并联而成的，表头就是一个小量程的磁铁式电流表，有时称之为灵敏电流计。

(1)电流表和电压表的基本工作原理

电流表和电压表的基本工作原理是：线圈中有电流通过时，通电线圈在永久磁铁所形成的磁场中受到安培力的作用而偏转，随着电流的增大，线圈的偏转角度增大，于是指针所指示的测量值就大。通过表头的电流增大时，表头两端的电压也随之增大，所以可以在表头上描绘出相应的刻度，用来测量电流和电压。

(2)满偏电流和满偏电压

电流表表头内电阻 R_g 一般是不会改变的，当表头内通过的电流增大到一定的值时，指针会偏转到最大，此时的电流称为满偏电流，用 I_g 表示；此时表头两端的电压也是最

大，称为满偏电压，用 U_g 来表示。根据欧姆定律可知：

$$U_g = I_g \cdot R_g$$

(3)电压表的改装方法

电压表 ＝表头＋串联的分压电阻，如图 5-32 所示。电压表 V 由表头 G 和分压电阻 R 组成，虚线框中部分就是电压表的结构。

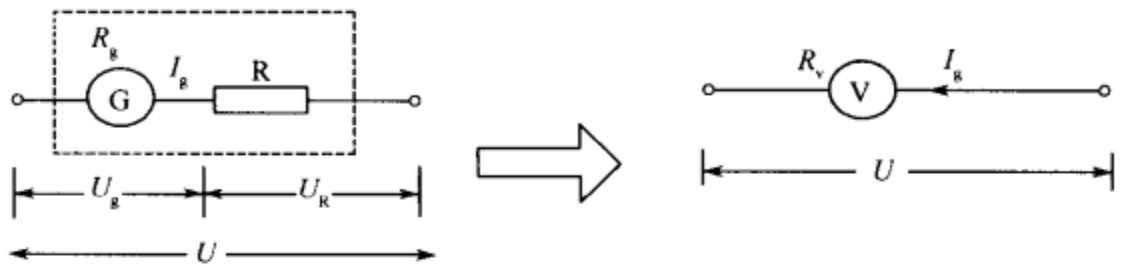


图 5-32　电压表的改装

例如，有一个灵敏电流计 G，内阻 $R_g = 10\Omega$，满偏电流 $I_g = 3\text{mA}$，把它改装成量程为 3V 的电压表，要串联一个多大的电阻 R?

量程为 3V 的意思就是当电压表两端加上 $U = 3\text{V}$ 的电压时，表头两端的电压达到满偏电压 U_g，通过表头的电流达到满偏电流 I_g，表头的指针此时指向最大刻度处，而最大刻度处则直接标上 3V。

表头 G 的满偏电压 $U_g = I_g \cdot R_g = 0.03\text{V}$，分压电阻 R 分担的电压应该为 $U_R = U - U_g = 3\text{V} - 0.03\text{V} = 2.97\text{V}$。

根据欧姆定律可以求出分压电阻 R 的阻值为：

$$R = \frac{U_R}{I_R} = \frac{U_R}{I_g} = \frac{U_R}{U_g / R_g} = \frac{U_R}{U_g} R_g = \frac{2.97}{0.03} \times 10 = 990(\Omega)$$

电压表 V 的内阻 R_v 等于 R_g 和串联的分压电阻 R 的总和，即 $R_v = R_g + R = 1000(\Omega)$

(4)电流表的改装方法

电流表＝表头＋并联的分流电阻，如图 5-33 所示。电流表 A 由表头 G 和分流电阻 R 组成，虚线框中部分就是电流表的结构。

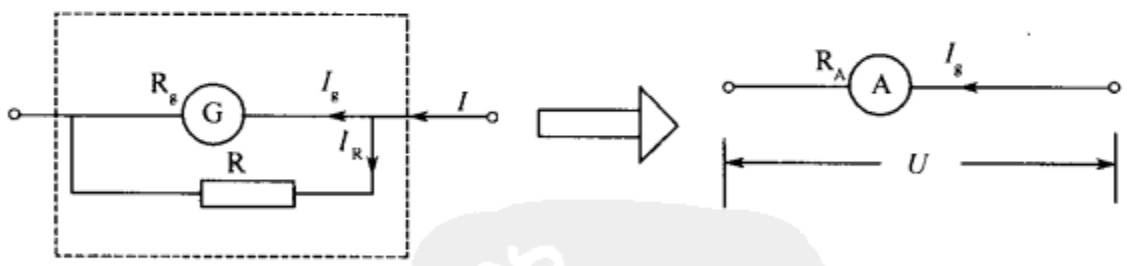


图 5-33　电流表的改装方法

例如，有一个灵敏电流计 G，内阻 $R_g = 25\Omega$，满偏电流 $I_g = 3\text{mA}$。把它改装成量程为 0.6A 的电流表，要并联一个多大的电阻 R?

量程为 0.6A 的意思就是当通过电流表的电流 $I = 0.6\text{A}$ 时，通过表头的电流达到满偏电流 I_g，表头两端的电压达到满偏电压 U_g，表头的指针此时指向最大刻度处，而最大刻度处则直接标上 0.6A。

通过分流电阻 R 的电流应该为 $I_R = I - I_g = 0.6\text{A} - 0.003\text{A} = 0.597\text{A}$

根据欧姆定律可以求出分流电阻：

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$R=\frac{U_R}{I_R}=\frac{U_g}{I_R}=\frac{I_gR_g}{I_R}=\frac{I_g}{I_R}R_g=\frac{0.003}{0.597}\times25=0.126(\Omega)$$

电流表 A 的内阻 R_A 等于 R_g 和并联的分流电阻 R 的等效电阻，即

$$R_A=\frac{R\times R_g}{R+R_g}=0.125(\Omega)$$

2. 电动式扬声器

扬声器又称喇叭，它是收音机、录音机、音响设备中的重要元件，它的质量直接影响音响效果。

扬声器的种类较多，在电视机、收音机中常用的是电动式扬声器，它是由于通电导线在磁场中受安培力作用发生运动，带动空气振动而发声的。电动式扬声器由环形磁体、音圈、纸盆等组成，如图 5-34(a)所示，在环形磁体的作用下，软铁柱和上下两个软铁板都被磁化，在它们的间隙中形成较强的磁场，磁感线的方向呈辐射状，如图 5-34(b)所示。当大小和方向交替变化的电流通过音圈时，音圈就会在安培力的作用下带动纸盆沿上下方向振动，发出声音。

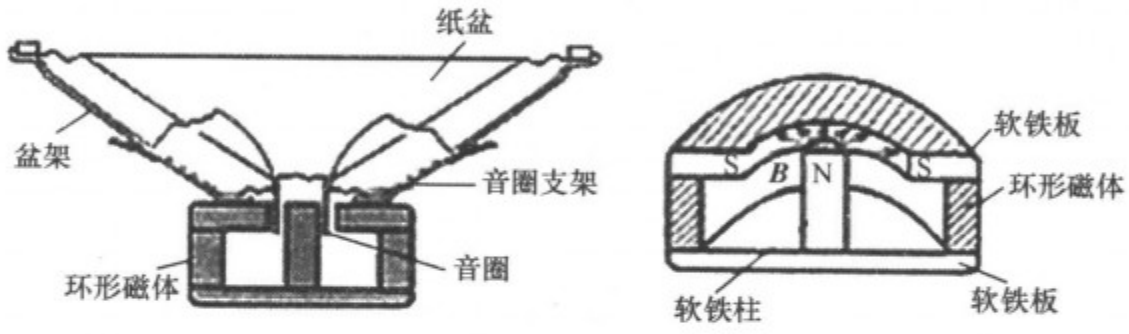


图 5-34　扬声器的构造和磁体结构

(a)扬声器的构造；(b)扬声器永磁体的结构。

四、磁场中的运动电荷

1. 磁场对运动电荷的作用力——洛仑兹力

磁场对电流有作用力，既然电流是电荷的运动产生的，人们自然会想到，磁场力可能是直接作用在运动电荷上的，作用在整个导线上的安培力，不过是作用在运动电荷上的力的宏观表现。

现在用实验来检验这个想法。图 5-35(a)是一个电子射线管，从阴极发射出来的电子束，在阴极和阳极间的高压电的作用下，轰击到长条形的荧光屏上发出荧光，可以显现出电子束的运动轨迹。

实验表明，在没有外磁场时电子束是沿直线前进的，如果把射线管放在蹄形磁铁的两极间，如图 5-35(b)所示，从荧光屏上可以看到电子束运动的径迹发生了弯曲。这表明运动电荷确实受到了磁场的作用力，磁场对运动电荷的作用力通常叫做**洛仑兹力**。

洛仑兹力的方向也可以用左手定则来判定：伸开左手，让磁感线进入手心，四指指向正电荷运动的方向，那么拇指所指的方向就是正电荷所受的洛仑兹力的方向。运动的负电荷在磁场中所受的洛仑兹力，方向与正电荷相反。

洛仑兹力的大小可以从磁场对电流的作用力计算出来。设导线中单位体积内含有的运动电荷数是 n，每个电荷的电量是 q，电荷的平均定向移动速率是 v，导线的横截面积是

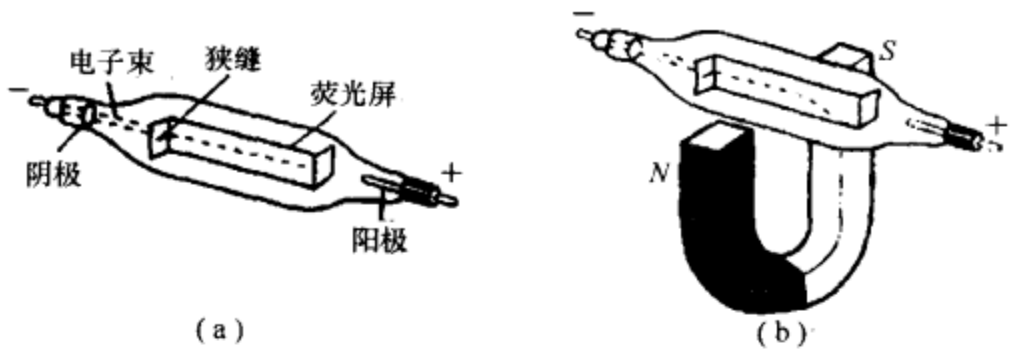


图 5-35　电子射线管

S，那么，通过导线的电流强度：

$$I=nqvS \tag{5-4}$$

磁场对电流的作用力是 $F=BIL\sin\theta$，这个力可以看作是作用在每个运动电荷上的洛仑兹力的合力。设洛仑兹力为 f，这段导线内运动电荷的总数为 N，则 $Nf=F$，即 $Nf=BIL\sin\theta$，代入 $I=nqvS$，得到

$$Nf=nqvSLB\sin\theta$$

导线中运动电荷总数 N，等于单位体积内的运动电荷数 n 与体积 SL 的乘积，即 $N=nSL$，因此上式简化为

$$f=qvB\sin\theta \tag{5-5}$$

这就是说，洛仑兹力的大小等于电荷的电量 q、电荷的速率 v、磁感应强度 B 以及 v 和 B 间的夹角 θ 的正弦 $\sin\theta$ 的乘积。在国际单位制中，式(5-5)中的各个物理量的单位分别为牛顿、库仑、米/秒、特斯拉。

当 $\theta=90°$ 时，即电荷的运动方向与磁场方向垂直时，电荷所受的洛仑兹力最大，等于 qvB；当 $\theta=0°$ 时，即电荷的运动方向与磁场方向一致时，电荷所受的洛仑兹力最小，等于零；当 θ 角为其他数值时，洛仑兹力的大小在最大值和最小值之间。

2. 带电粒子在磁场中的运动

带电粒子在磁场中运动时受到洛仑兹力的作用，若已知洛仑兹力，就可以确定带电粒子在磁场中的运动情况。

例如，一个带电粒子在匀强磁场中运动，它的初速度方向与磁场方向垂直，粒子的运动轨迹将是怎样的呢？

由于初速度的方向和洛仑兹力的方向都在与磁场方向垂直的平面内，没有任何作用使粒子离开这个平面，所以粒子只能在这个平面内运动。洛仑兹力总是与粒子的运动方向垂直，它只改变粒子速度的方向，不改变粒子速度的大小，所以粒子的速率 v 是恒定的，这时洛仑兹力 $f=qvB$ 的大小也是恒定的，它对运动粒子起着向心力的作用。因此粒子的运动一定是匀速圆周运动，如图 5-36 所示。

上述推论可以用特制的电子射线管来验证。由电子枪发出的电子射线可以使管内的低压水银蒸气发出辉光，显示出电子的径迹，在暗室中可以清楚地看到：没有磁场作用时，电子的径迹是直线；在管子外面加上一个匀强磁场(这个磁场是由两个平行的通电环形线圈产生的)，电子的径迹就弯曲成圆弧。在现代科学技术中，常常要使带电粒子在电场的作用下运动，或者在磁场的作用下运动，或者在电场和磁场的共同作用下运动。例如示波

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

器中的示波管、电视机中的显像管、电子显微镜等，都是利用电场和磁场来控制电荷的运动的。

运动的电荷在磁场中受到洛仑兹力的作用，运动方向会发生偏转，这一点对地球上的生命具有十分重要的意义。从太阳或其他星体上，时刻都有大量的高能粒子放出，称为宇宙射线。这些高能粒子，如能到达地面，将会对地球上的生命造成危害，庆幸的是，地球周围存在磁场，地磁改变了宇宙射线中带电粒子的运动方向，对宇宙射线起到了一定的阻碍作用，如图 5-37 所示。

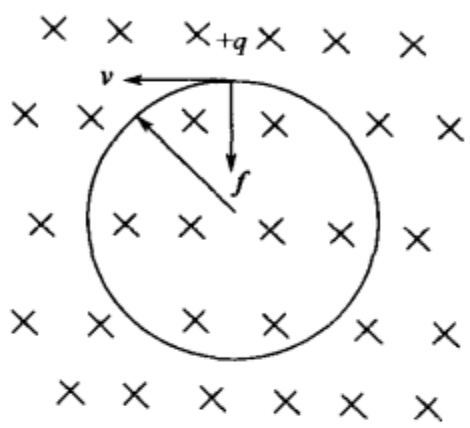


图 5-36　带电粒子的圆周运动

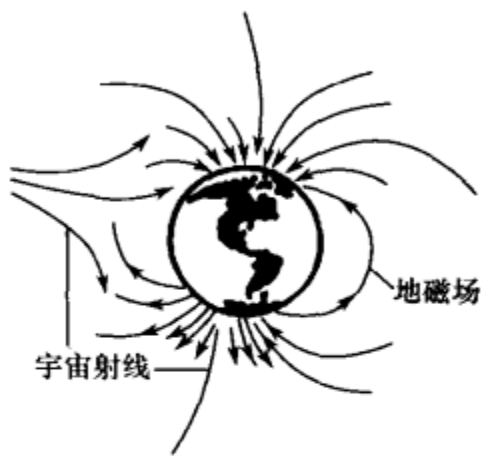


图 5-37　宇宙射线

例 13：一个初速度为零的质子，经过电压是 $1.3\times10^{3}\,\mathrm{V}$ 的电场加速后，垂直进入磁感应强度 B 是 0.20T 的匀强磁场中。质子的质量 $m=1.67\times10^{-27}\,\mathrm{kg}$，电量 $q=1.6\times10^{-19}\,\mathrm{C}$。试求：①质子进入磁场时的速率；②质子在磁场中运动的轨道半径；③质子做匀速圆周运动的周期。

解：①质子在电场中得到的动能等于电场所做的功，即

$$\frac{1}{2}mv^2=qU$$

所以质子进入磁场时的速率

$$v=\sqrt{\frac{2qU}{m}}=\sqrt{\frac{2\times1.6\times10^{-19}\times1.3\times10^{3}}{1.67\times10^{-27}}}=5.0\times10^{5}(\mathrm{m/s})$$

②质子在磁场中做匀速圆周运动的向心力是由洛仑兹力 $f=qvB$ 提供的，所以 $qvB=mv^2/r$，解出 r，得到

$$r=\frac{mv}{qB}\tag{5-6}$$

代入数值得到

$$r=\frac{mv}{qB}=\frac{1.67\times10^{-27}\times5.0\times10^{5}}{1.6\times10^{-29}\times0.2}=2.6\times10^{-2}(\mathrm{m})$$

从式(5-6)知道，带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的轨道半径与粒子的速率成正比，速率越大，轨道半径也越大。

③匀速圆周运动的周期 $T=2\pi r/v$，把 $r=\frac{mv}{qB}$ 代入，得到

$$T=\frac{2\pi m}{qB} \tag{5-7}$$

代入数值得到

$$T=\frac{2\pi m}{qB}=\frac{2\times 3.14\times 1.67\times 10^{-27}}{1.6\times 10^{-19}\times 0.2}=3.3\times 10^{-7}(\mathrm{s})$$

从式(5-7)知道,带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的周期与轨道半径和运动速率无关,回旋加速器就是依据这个道理制成的。

阅读材料:阴极射线管及光栅/图像显示原理

(1)阴极射线管(CRT)

CRT 是目前广泛应用的显示器件,它最早用于电视接收机,然后用于计算机系统,作为字符显示器和图像、图形显示器。如图 5-38 为显像管示意图。主要由玻璃外壳(管壳)、荧光屏、电子枪(管颈内的部件)等组成。

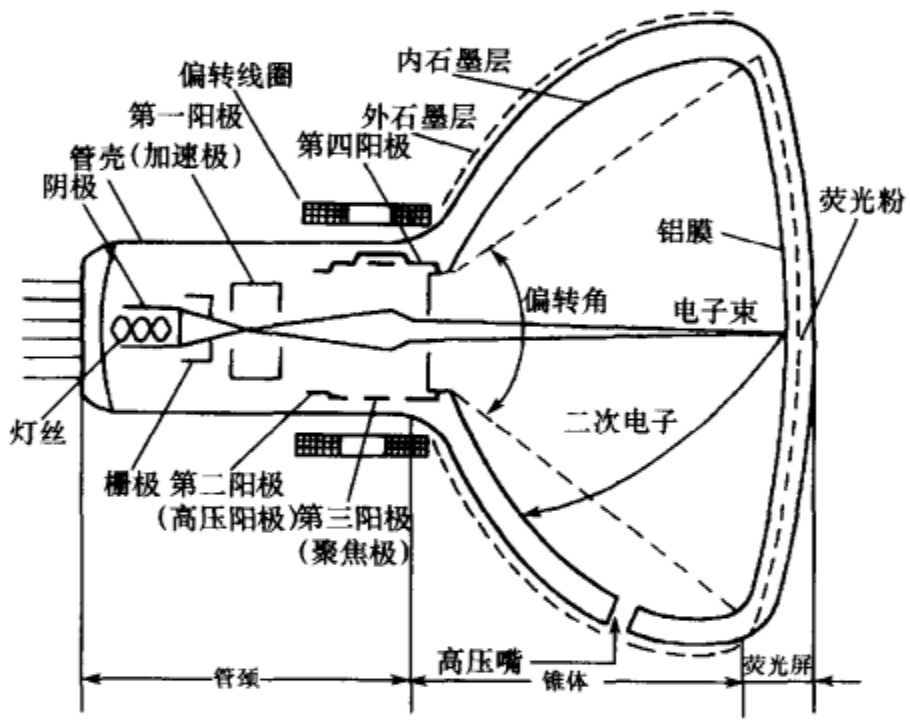


图 5-38　阴极射线管的结构

①玻璃外壳:玻璃外壳又由玻璃管屏(荧光屏),玻璃管锥(锥体)、玻璃管颈(管颈)三部分组成。

②荧光屏:在管屏的内壁涂有一层很薄的荧光粉,使管屏成为荧光屏,在电子束的高速轰击下,荧光粉会发出白光。

③电子枪:电子枪由灯丝、阴极、栅极、加速极(第一阳极)、聚焦极(第三阳极)和高压阳极(第二、四阳极)组成,如图 5-39 所示。电子枪的作用是发射出一束聚焦良好的电子束,以高速轰击荧光屏上的荧光粉,使之发光。

灯丝(F):灯丝由钨铝合金制成,一般被绕制成螺旋形,以便在有限空间内增加灯丝长度,提高热功率。灯丝加上额定电压后,就会产生电流而发热。灯丝的作用是烘烤阴极,使阴极发射电子。

阴极(K):它是一个金属圆筒,筒内放着灯丝。阴极以金属材料为基底,表面涂有易

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

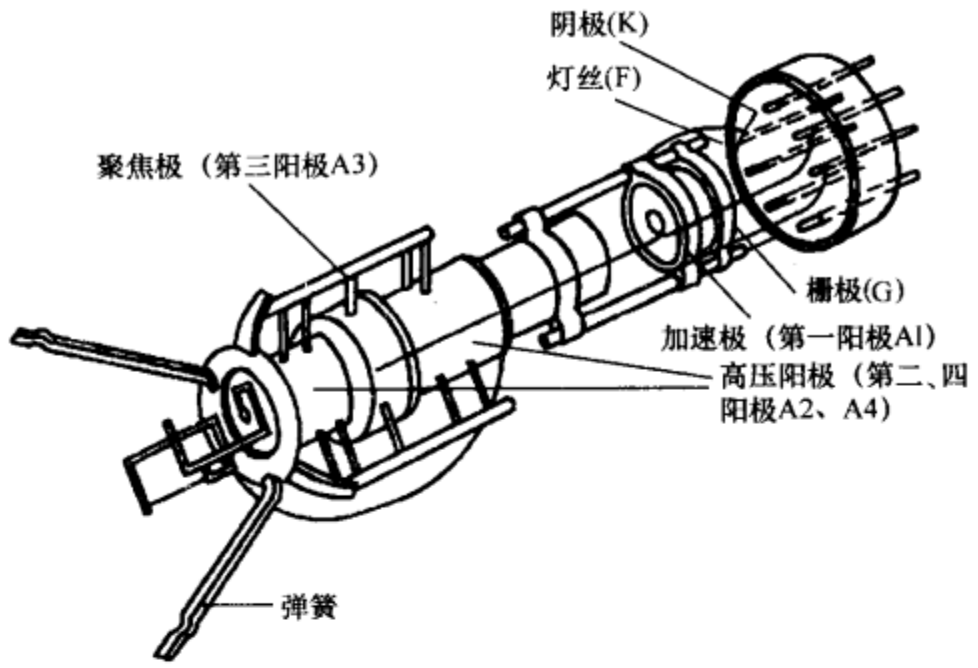


图 5-39　电子枪结构

于发射电子的氧化物，其作用是发射电子。

栅极(G)：它是一个金属圆筒，顶部有一个小孔，以便让电子束通过。栅极套在阴极外面，离阴极很近，故其电位变化对由阴极电子穿过它的强弱影响很大。应用时要求栅极电位低于阴极电位，即栅极电压为负。改变栅极电压就可以控制电子束的强弱，从而控制荧光屏的发光程度。

加速极(第一阳极 A1)：它也是个顶部开有小孔的金属圆筒，其位置紧靠栅极。工作时它加有电压，以对阴极发射的电子进行加速，使之向荧光屏运动。

高压阳极(第二、四阳极，A2、A4)：它是用金属连接起来的两个金属圆筒，圆筒中央开有小孔，中间隔着聚焦极。高压阳极上加有 1 万 V 以上直流高压，这个高压由管锥上的阳极插座提供，再经内壁石墨层及金属弹簧片加到高压阳极。高压阳极的作用是使电子束高速轰击荧光屏。

聚焦极(第三阳极 A3)：它是一个金属圆筒。加有聚焦直流电压，它与高压阳极组成聚焦透镜，使电子束聚焦成直径很小的细束，此时荧光屏上的图像最为清晰。

(2)光栅和图像显示原理

当轰击荧光屏的电子束不发生任何偏转时，电子束会始终轰击在荧光屏中心一个点上，此时荧光屏只有一个亮点。为了使整个荧光屏都发光，必须在管锥根部套一只偏转线圈，使电子束在偏转磁场的作用下发生水平、垂直方向偏转，这又称为电子束扫描。

行扫描(水平扫描)：由行偏转线圈完成。在行偏转线圈中流入行频锯齿波电流，产生垂直方向磁场，使电子束作水平方向扫描，如图 5-40 所示。我国规定行扫描频率 f_H 为 15625Hz，行扫描周期 T_H 为 64μs。并规定从左到右扫描为正程扫描，时间为 52μs；从右到左扫描为逆程扫描，时间为 12μs。

场扫描(垂直扫描)：由场偏转线圈完成。在场偏转线圈中流入场频锯齿波电流(见图 5-41(a))，产生水平方向磁场，使电子束作垂直方向扫描。我国规定场扫描频率 f_v 为 50Hz，场扫描周期 T_v 为 20ms。并规定从上到下扫描为正程扫描，时间为 18.388ms；从下到上扫描为逆程扫描，时间为 1 .612ms。

电子束对荧光屏的行、场扫描是同时进行的。显然，电子束在垂直方向来回扫描一

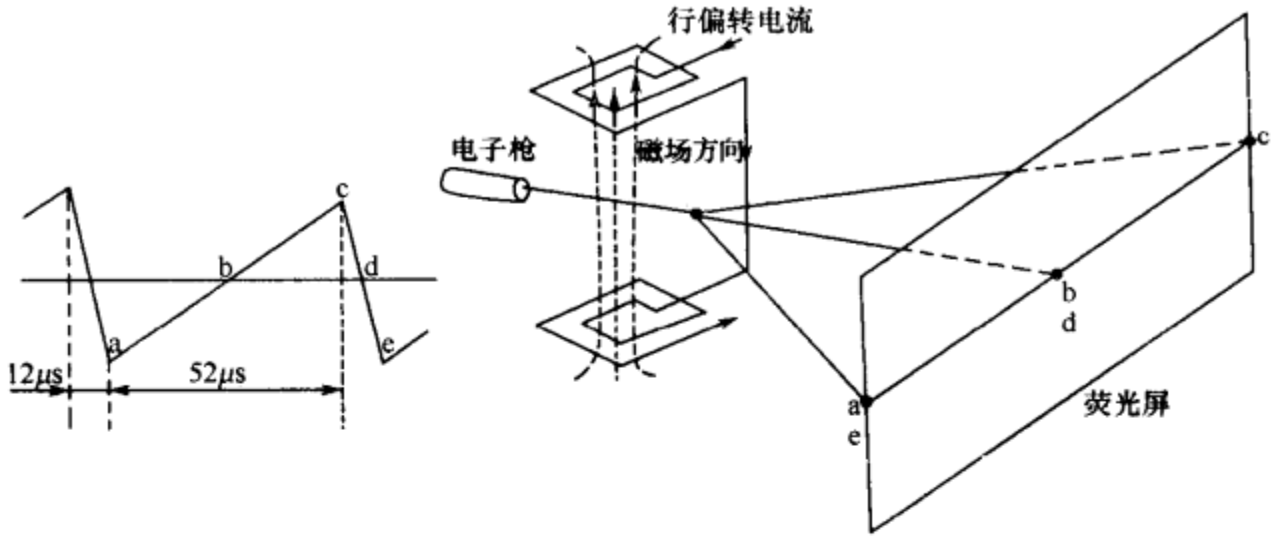


图 5-40　行扫描示意图

次，水平扫描就有 312.5 次(15625/50＝312.5)，即一场光栅由 312.5 行扫描线组成，如图 5-41(b)所示。由于电子束扫描频率非常高，再加上荧光粉的余辉效应及人眼的暂留视觉特性，使人感受到荧光屏整屏连续发光，这就是光栅。

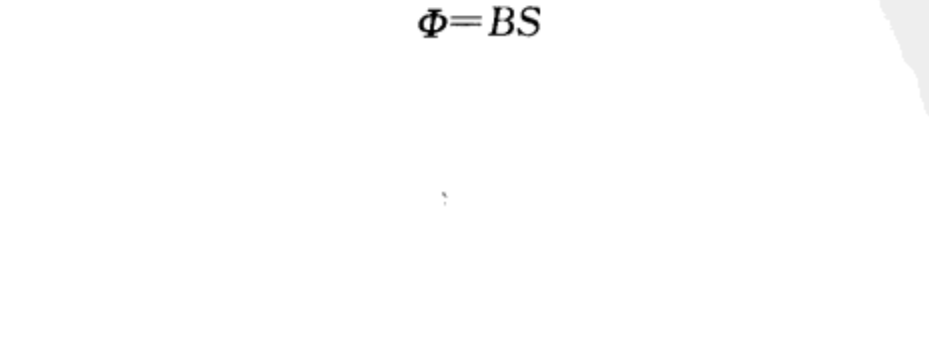


图 5-41　场锯齿波电流与行、场扫描

(a)场频锯齿波；(b)行、场扫描。

在电子束扫描的基础上，再在显像管阴极加图像信号，该信号使电子束电流强弱按照图像信号的规律进行变化，可使荧光屏重现图像。

第三节　电磁感应

一、磁通量和电磁感应现象

奥斯特发现电流的磁效应以后，人们受到了启发；既然电流能够产生磁场，那么，反过来利用磁场能不能获得电流？英国物理学家法拉第经过 10 年坚持不懈的努力，终于在 1831 年发现了这个现象。法拉第的发现，进一步揭示了电和磁的联系，导致了发电机的发明，实现了机械能转化为电能。

1. 磁通量

在电磁学里常常要讨论穿过某一个面的磁场，为此需要引入一个新的物理量——磁通量。假设在匀强磁场中有一个与磁场方向垂直的线圈平面，面积为 S，磁场的磁感应强度为 B(如图 5-42 所示)，那么，把磁感应强度 B 与面积 S 的乘积，叫做穿过这个面的磁通量，用 Φ 表示，即

$$\Phi=BS \tag{5-8}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式(5-8)适用于均匀磁场中，且磁感应强度 B 与线圈平面垂直。

从式(5-8)可以看出，面积越大、磁感应强度越大，穿过这个面的磁通量就越大。当线圈平面与磁场方向垂直时，线圈内的磁通量为最大；当线圈平面与磁场方向平行时，由于通过线圈内的磁感应线为零，因此，磁通量为零；当线圈平面与磁感线的方向有一夹角时，取垂直磁场方向的面积投影为磁通量计算面积。

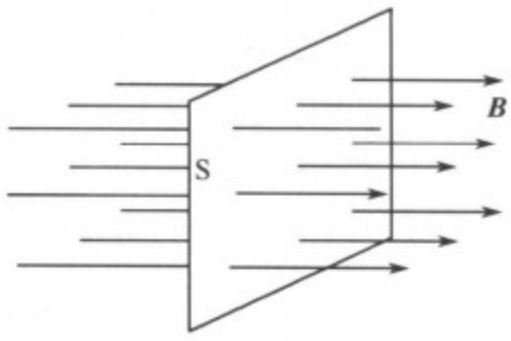


图 5-42　磁通量

例如，如图 5-43 所示，线圈平面与水平方向成 θ 角，磁感应线方向竖直向下，设均匀磁场的磁感应强度为 B，线圈面积为 S，求穿过线圈的磁通量时，应先求出线圈平面投影到与 B 垂直方向上的面积。

因为　　$S_{\perp}=S\cdot\cos\theta$

所以　　$\Phi=BS_{\perp}=B\,S\cdot\cos\theta$

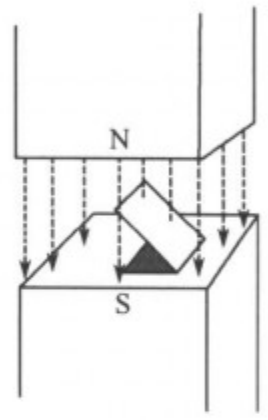


图 5-43　线圈平面与磁感线的方向有一夹角时

磁通量的意义可以用磁感线形象地描述：穿过某一面积内的磁感线条数越多，磁通量就越大。磁感线穿过某一面积时要注意磁感线穿过的方向，因为磁感应强度是矢量。在国际单位制中，磁通量的单位是韦伯(Wb)，$1\text{Wb}=1\text{Tm}^2$(其中 T 为磁感应强度单位，特斯拉，m^2 为面积单位，平方米)。

另外，从 $\Phi=BS$ 可以得到 $B=\Phi/S$，这表示磁感应强度等于穿过单位面积内的磁通量，因此通常把磁感应强度也叫做磁通密度。

2. 电磁感应现象

(1)实验一

如图 5-44 所示，在磁场中悬挂一根导体 ab，把它的两端与电流表连接起来。电流能够产生磁场，把导体放在磁场中是否会产生电流呢？保持导体 ab 不动，电流表的指针并不偏转，表明导体中没有电流。

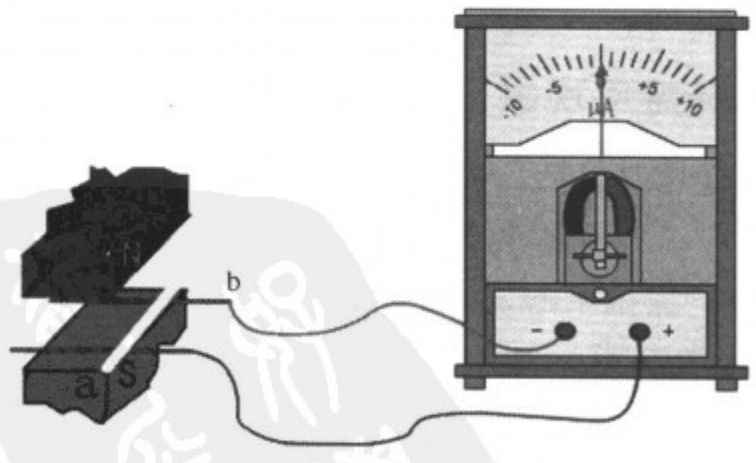


图 5-44　电磁感应现象实验一

换用强磁体，保持 ab 不动，电流表的指针仍不偏转。

保持电路闭合，让导体 ab 在磁场中上下运动，还是没有电流。

依然保持电路闭合，让导体 ab 在磁场中左右运动，电流表的指针偏转了。

可见，要使导体产生电流，导体必须在磁场中运动，但只是运动并不够，如上述导体ab上下运动时并不产生电流。这是因为导体ab在左右运动时切割磁感线，所以产生电流，上下运动时不切割磁感线，所以不产生电流。如果导体斜着运动，也切割磁感线，也会产生电流。

从磁通量的角度来分析这一问题。本实验中，导线的一部分向左或向右运动时，穿过这一电路中的磁通量就会增加或减少，因此，电路中就有电流。

(2)实验二

如图5-45所示，依次把磁铁插入线圈，静止地放在线圈中，最后从线圈里拿出来，观察电路中是否有电流产生。

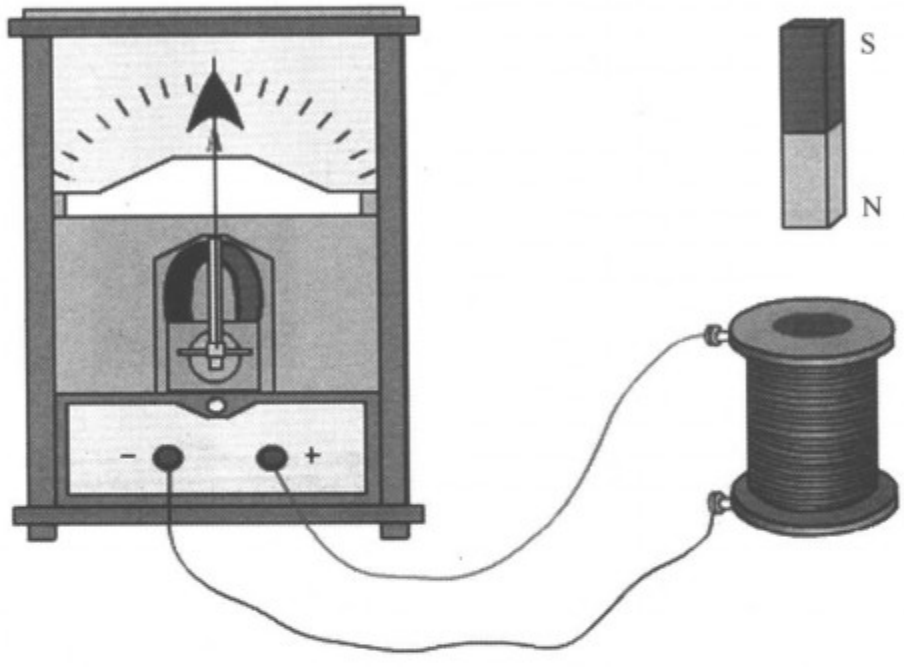


图5-45　电磁感应现象实验二

实验发现，把磁铁插入线圈和从线圈中抽出时，都有电流产生，磁铁静止在线圈中时，没有电流。

为便于理解这一现象，现绘出磁铁的磁感线，如图5-46所示，从图中可以看出，把磁铁插入线圈或从线圈中抽出时，组成线圈的导线切割了磁感线，因此电路中有电流产生。

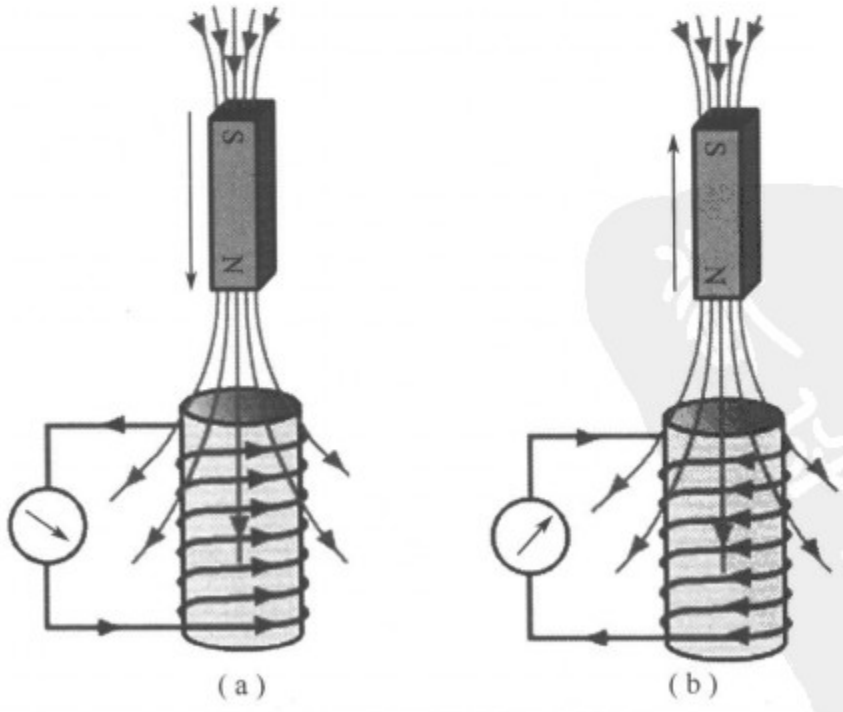


图5-46　线圈和磁铁的运动

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

也可以从另一个角度研究这个问题。当磁体离线圈很远时，可以认为穿过线圈的磁通量是零，在磁体插入线圈的过程中，磁通量增加，把磁体从线圈中抽出时，磁通量减少，这两种情况下电路中都有电流；而当磁体和线圈相对静止时，穿过线圈的磁通量不变，这时闭合电路中没有电流。

(3)实验三

以上两个实验都是由于导体和磁体有相对运动而使穿过闭合电路的磁通量发生改变，如果导体和产生磁场的物体相对静止，但是磁场的强弱发生变化，从而引起闭合电路中磁通量改变，这种情况下闭合电路中是否也能产生电流呢？下面进行分析。

如图 5-47 所示，螺线管 A 通过变阻器和开关连到电源上，螺线管 B 的两端连到电流表上，把螺线管 B 套在 A 的外面。在开关闭合与断开的瞬间，以及开关闭合不动时，观察电路中是否有电流产生。

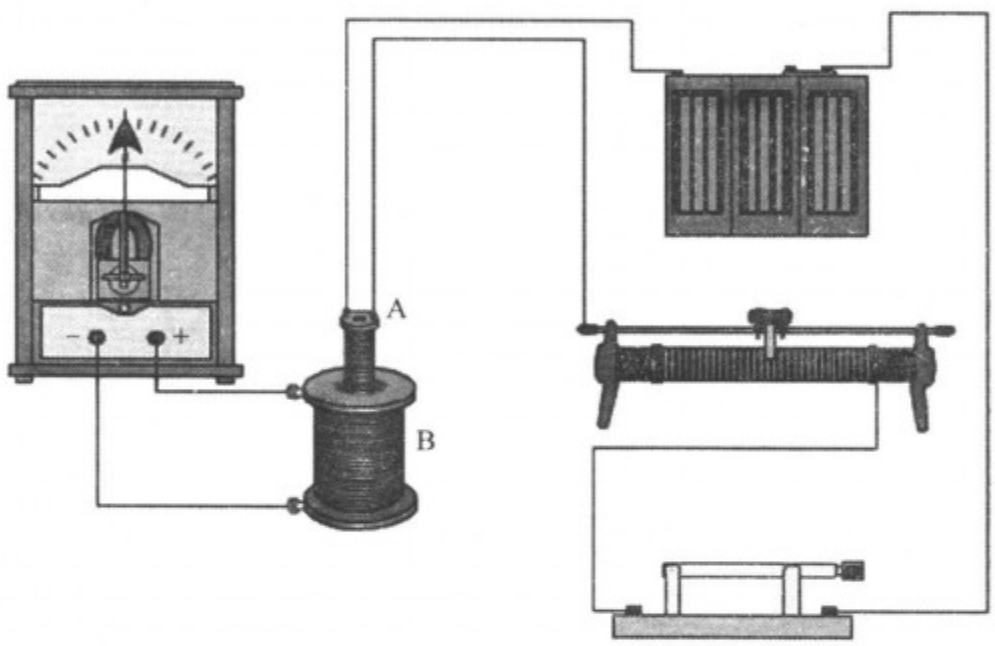


图 5-47　电磁感应现象实验三

从实验中看到，在开关闭合与断开的瞬间，有感应电流产生；当开关闭合不动时，没有电流。如果在开关闭合之后，通过移动变阻器滑片来改变螺线管 A 中的电流，从而改变它在 B 中产生的磁通量，也能观察到感应电流。

实验现象可以这样解释：开关闭合时，螺线管 A 产生的磁场磁感应强度由零增至最大，由于它插在螺线管 B 的里面，所以穿过 B 的磁通量增加；而在开关断开的瞬间，磁通量减小。这个实验表明，由于磁场磁感应强度的改变而引起的磁通量变化，同样能在闭合电路中产生电流，稳定不变的磁通量不能在闭合电路中产生电流。

(4)结论

法拉第通过大量实验总结出如下结论：不论用什么方法，只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中就有电流产生，这种由于磁通量的变化而产生电流的现象叫做电磁感应，产生的电流叫做感应电流。

能量守恒定律是自然界的普遍规律，同样适用于电磁感应现象，在实验一和实验二中，移动导体或移动磁铁时外力做功，消耗的电能是从机械能转化来的，发电机就是应用这个原理制成的。在实验三中，电能是由螺线管 A 转移到螺线管 B 的，变压器就是应用这个原理制成的。

二、法拉第电磁感应定律

1. 感应电动势

要使闭合电路中有电流，电路中必须有电源，电流是由电源的电动势产生的。在电磁感应现象中，既然闭合电路中有感应电流，这个电路中就一定有电动势，电路断开时，虽然没有感应电流，电动势依然存在。在电磁感应现象中产生的电动势叫做感应电动势，产生感应电动势的那部分导体就相当于电源。如前面实验一中的导体棒、实验二中的线圈和实验三中的螺线管 B 都相当于电源，感应电流的强弱由感应电动势的大小和闭合电路的电阻决定，可以通过闭合电路的欧姆定律算出。

2. 法拉第电磁感应定律

在前面的实验一中，导体棒切割磁感线的速度越大，穿过闭合电路所围面积的磁通量就变化得越快，感应电流和感应电动势就越大。在实验二中，磁铁运动得越快，穿过线圈的磁通量就变化得越快，感应电流和感应电动势就越大。

这些实验表明，感应电动势的大小与磁通量变化的快慢有关。用磁通量的变化率来描述磁通量变化的快慢，它是磁通量的变化量与产生这个变化所用时间的比值。例如：通过甲、乙两个线圈的磁通量都从零增加到某个定值，但是甲线圈用了 0.1s，乙线圈用了 0.2s，显然，穿过甲线圈的磁通量的变化率比较大。

如果时刻 t_1 的磁通量是 Φ_1，时刻 t_2 的磁通量变为 Φ_2，在 t_1 到 t_2 这段时间里磁通量的变化量就是 $\Phi_2-\Phi_1$，记为 $\Delta\Phi=\Phi_2-\Phi_1$。由于这个变化是在 $\Delta t=t_2-t_1$ 这段时间内发生的，所以，磁通量的变化率可以表示为$\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$。

法拉第经过大量的实验证明：电路中感应电动势的大小，与穿过这一电路的磁通量的变化率成正比。这就是法拉第电磁感应定律。

如果用 E 表示感应电动势，单位是伏特(V)；磁通量和时间的单位分别用韦伯(Wb)和秒(s)，法拉第电磁感应定律可以用公式表示为：

$$E=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \tag{5-9}$$

一个闭合电路可以看做是只有一匝的线圈，如果线圈的匝数为 n，由于每匝线圈的感应电动势都为$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$，这 n 匝线圈又是串联在一起的，所以整个线圈的电动势是：

$$E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \tag{5-10}$$

在实际工作中，为了获得较大的感应电动势，常常采用多匝线圈。

式(5-9)是计算感应电动势的普遍公式，适用于各种情况。如果磁通量的变化是由于导体和磁体的相对运动引起的，如图 5-48 所示，可以把式(5-9)变成一种更便于应用的形式。

矩形导体线框 abcd 位于匀强磁场中，磁感应强度为 B，线框平面跟磁感线垂直，线框可动部分 ab 的长度是 L，运动速度的大小是 v，速度方向与 ab 垂直，同时也与磁场方向垂直。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

这个问题中，穿过闭合电路的磁通量变化 $\Delta\Phi$ 是由矩形 abcd 的面积变化引起的，因此先计算 Δt 时间内的面积变化量 ΔS。在 Δt 时间内，可动部分由位置 ab 运动到 a′b′，闭合电路所围面积的增量为图中的阴影部分，而 aa′的长度正好是 Δt 时间内导体 ab 运动的距离 $v\Delta t$，因此

$$\Delta S = Lv\Delta t$$

磁通量的变化量

$$\Delta\Phi = B\Delta S = BLv\Delta t$$

代入式(5-9)，得到

$$E = BLv \tag{5-11}$$

式(5-11)表示，在匀强磁场中，当磁感应强度、导线、导线的运动方向三者互相垂直时，感应电动势等于磁感应强度 B、导线长度 L、导线运动速度 v 的乘积。需要说明的是，这种由于导体的运动而产生的电动势，也称为动生电动势。

用式(5-11)计算感应电动势时，式中的单位均应采用国际单位制单位，即 E、B、L、V 的单位应分别用伏(V)、特斯拉(T)、米(m)、米/秒(m/s)。

如果导线的运动方向与导线本身垂直，但与磁力线方向有一个夹角 θ(如图 5-49 所示)，可以把速度 v 分解为两个分量：垂直于磁力线的分量 $v_1 = v\sin\theta$，平行于磁力线的分量 $v_2 = v\cos\theta$。后者不切割磁力线，不产生感应电动势；前者切割磁力线，产生的感应电动势为 BLv_1，而 $v_1 = v\sin\theta$，所以，感应电动势为：

$$E = BLv\sin\theta \tag{5-12}$$

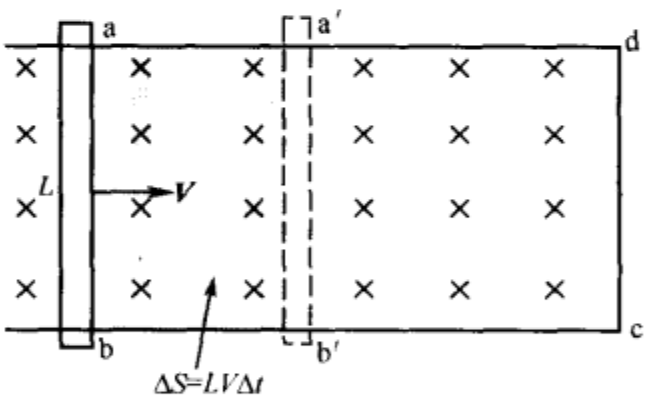


图 5-48　运动的导体

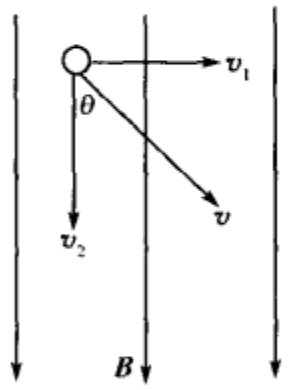


图 5-49　导体的运动方向与磁力线方向有一夹角

式(5-12)表示：当导线的运动方向与磁力线方向有一个夹角 θ 时，导线切割磁力线时产生的感应电动势的大小，与磁感应强度 B、导线长度 L、运动速度 v 以及运动方向和磁力线方向的夹角 θ 的正弦 $\sin\theta$ 成正比。

归纳总结：感应电动势的产生方式

一是导体切割磁感线运动产生动生电动势；二是磁感应强度变化产生感应电动势。为便于读者对照理解感应电动势和感应电流，现列表如下(见表 5-1)。需要强调的是：当回路不闭合时，仍有感应电动势，但无感应电流；只有当回路闭合时，感应电动势才会驱使电子在回路中定向运动，形成感应电流。

表 5-1　感应电动势与感应电流的比较

物理量 / 比较项目	感应电动势	感应电流
定义	电磁感应现象中产生的电动势	电磁感应现象中产生的电流
产生条件	磁通量变化(与电路是否闭合无关)	有感应电动势且电路闭合
大小	与穿过磁通量的变化率成正比	取决于感应电动势及电路的总电阻

阅读材料:寻找磁单极子

人们早就发现电和磁有很多相似之处。例如,带电体的周围有电场;磁体的周围有磁场;同种电荷互相推斥,异种电荷互相吸引;同名磁极互相推斥,异名磁极互相吸引。然而尽管电与磁有这样多的相似之处,它们却不是完全相似的。在电现象里,有电荷,正、负电荷可以单独存在;在磁现象里却没有发现磁荷,南北极也不能单独存在。一块磁体,无论把它分得多么小,总是有南极和北极。

但是,1931 年,著名的英国物理学家狄拉克从理论上预言了存在着只有一个磁极的粒子——磁单极子。根据磁单极子的理论,电和磁之间将更加相似。理论的动人前景,吸引了一批物理学家,用各种方法,在岩石中、在宇宙射线(即从宇宙空间飞来的粒子)中、在加速器实验中,去寻找磁单极子。但是,半个世纪过去了,并没有找到磁单极子,因此,人们推测,磁单极子可能是在宇宙形成初期产生的,残存下来的较少,而且分散在广袤的宇宙之中,要找到它并不容易。

目前,寻找磁单极子的实验还在进行中,有关磁单极子的理论,探讨得更加深入。如果磁单极子确实存在,现在的电磁理论就要做重大的修改,对整个物理学基础理论的发展,也将产生重大的影响。

三、楞次定律和右手定则——感应电流的方向

1. 楞次定律

在前面的实验中,电流表的指针有时向右偏转,有时向左偏转,表示在不同情况下感应电流的方向是不同的。那么,怎样来确定感应电流的方向呢? 下面利用图 5-50 的实验来研究这个问题。

前面,利用磁通量的概念概括出了产生感应电流的条件,由此可以想到,利用磁通量的概念来表达确定感应电流方向的规律。当把磁铁的 N 极移近或插入螺线管时,如图 5-50(a)所示,穿过螺线管的磁通量增加,从实验知道,这时感应电流的磁场方向与磁铁的磁场方向相反,阻碍原来磁通量的增加。当磁铁的 N 极离开螺线管或者从中拔出时,如图 5-50(b)所示,穿过螺线管的磁通量减少,从实验知道,这时感应电流的方向与图 5-50(a)中的方向相反,它的磁场方向 与磁铁的磁场方向相同,阻碍原来磁通量的减少。在其他电磁感应现象中,也有相同的规律,凡是由磁通量的增加引起的感应电流,它所激发的磁场就阻碍原来磁通量的增加;凡是由磁通量的减少引起的感应电流,它所激发的磁场就阻碍原来磁通量的减少。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

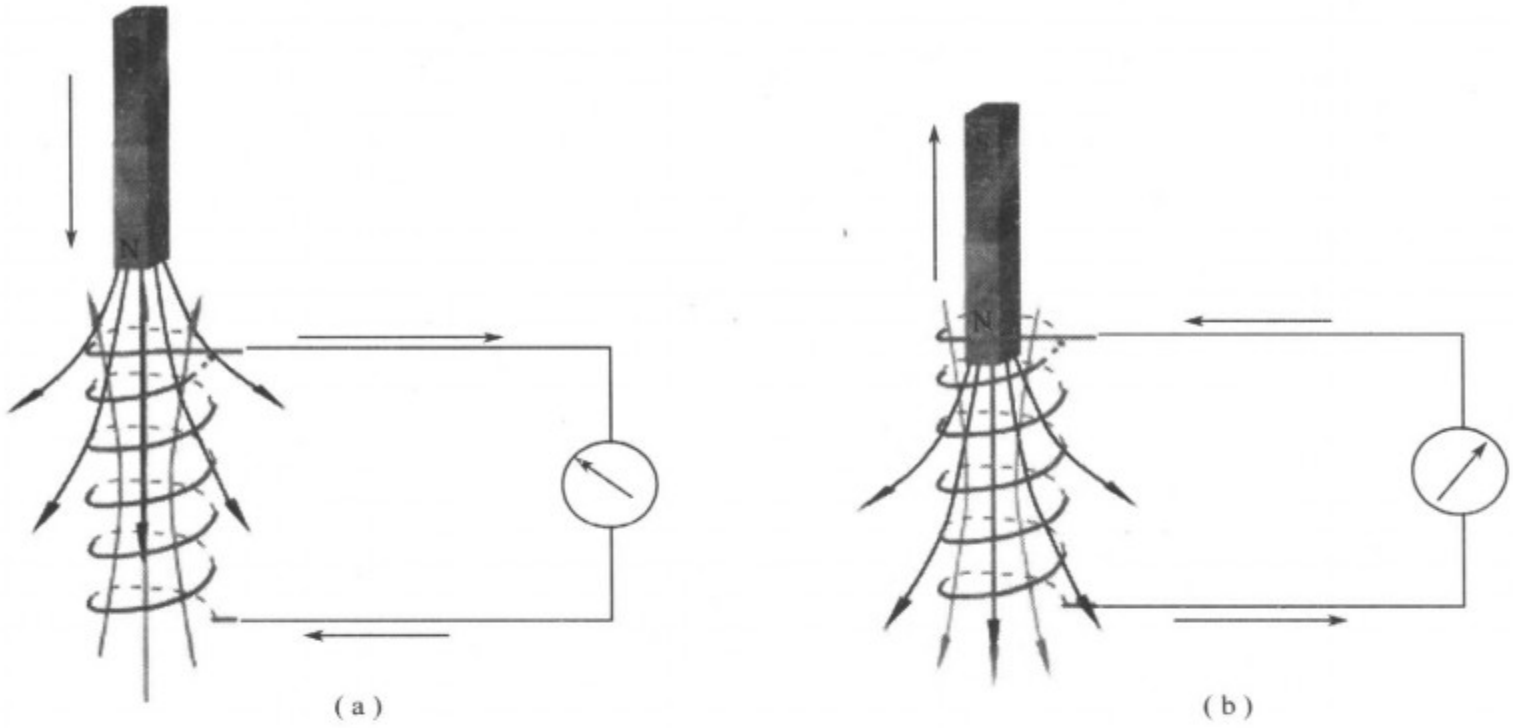


图 5-50　楞次定律实验

物理学家楞次(1804 年—1865 年)概括了各种实验结果,在 1834 年得出如下结论:感应电流具有这样的方向,就是感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。这就是楞次定律。

我们知道,通电螺线管相当于条形磁铁,也有两个磁极,当磁铁的 N 极移近螺线管时,利用安培定则可以知道,这时螺线管的上端是 N 极,因而磁铁受到推斥,阻碍磁铁相对于螺线管的运动;当磁铁的 N 极离开螺线管时,利用安培定则可以知道,这时螺线管的上端是 S 极,因而磁铁受到吸引,也要阻碍磁铁相对于螺线管的运动。总之,楞次定律的内容是:从磁通量变化的角度来看,感应电流总要阻碍磁通量的变化;从导体和磁场的相对运动的角度来看,感应电流总要阻碍相对运动。

利用楞次定律可以判断各种情况下感应电流的方向。判断感应电流的方向时,可按以下步骤进行:

①明确原来磁场的方向;

②判断穿过闭合电路的磁通量是增加还是减少;

③根据楞次定律确定感应电流的磁场方向;

④利用安培定则来确定感应电流的方向。

下面仍以图 5-50 所示的实验为例,用楞次定律确定磁铁的 N 极移近或离开螺线管时感应电流的方向。

把磁铁的 N 极移近螺线管时,原来的磁场方向向下,穿过螺线管的磁通量增加,从楞次定律知道,感应电流要阻碍磁通量的增加,因此感应电流的磁场方向与原来的磁场方向相反,即感应电流的磁场方向是向上的。知道了感应电流的磁场方向,利用安培定则就可以确定感应电流的方向,如图 5-50(a)所示。

当磁铁的 N 极离开螺线管时,原来的磁场方向向下,穿过螺线管的磁通量减少,从楞次定律知道,感应电流要阻碍磁通量的减少,因此感应电流的磁场方向与原来的磁场方向相同,方向也是向下的。知道了感应电流的磁场方向,利用安培定则就可以确定感应电流的方向,如图 5-50(b)所示。

重点提示："感应电流的磁场总是阻碍原磁通量的变化"。简单地说是"阻碍""变化"，而不是"阻碍"原磁场。具体地说就是：当原磁通量增加时，感应电流的磁场方向与原磁场方向相反；当原磁通量减少时，感应电流的磁场与原磁场方向相同。另外，"阻碍"并不是"阻止"，原磁通量如果增加，感应电流的磁场只能"阻碍"原磁通量的增加而不能阻止其增加，即原磁通量还是要增加。

2. 右手定则

如果磁通量的变化是由于导体切割磁感线引起的，感应电流的方向、磁感线方向、导体运动的方向三者之间的关系，就是右手定则：伸开右手，使拇指与四指在同一个平面内并与四指垂直，让磁感线垂直穿入手心，使拇指指向导体运动的方向，这时四指所指的方向就是感应电流的方向，如图 5-51 所示。

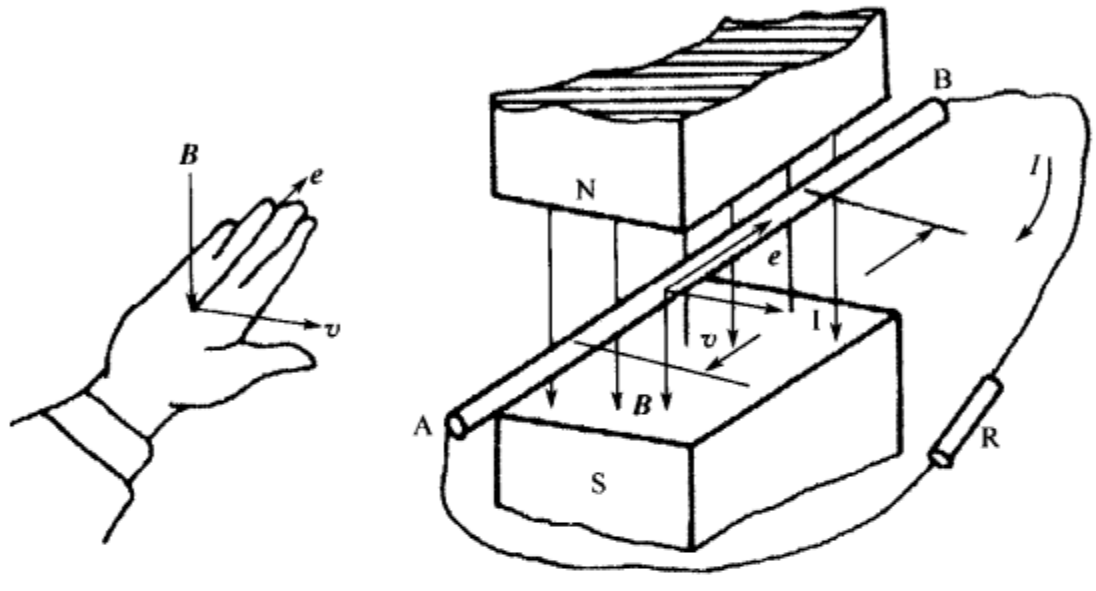


图 5-51　右手定则示意图

当导体 AB 向右运动时，用右手定则判断的结果是：感应电流是由 A 流向 B。现在用楞次定律来判断，导体 AB 向右运动时，穿过闭合电路的磁通量减少，从楞次定律知道，感应电流要阻碍磁通量的减少，因此感应电流的磁场方向与磁铁的磁场方向相同，即磁力线的方向也是向下的。利用安培定则可以知道，感应电流的方向是由 A 流向 B。可见，用楞次定律判定的感应电流的方向跟用右手定则判定的结果是一致的。

导体运动切割磁力线产生感应电流是磁通量发生变化引起感应电流的特例，所以判定电流方向的右手定则也是楞次定律的特例，右手定则和楞次定律具有一致性，用右手定则能判定的，一定也能用楞次定律判定，只是不少情况下不如用右手定则判定简单；反过来，用楞次定律能判定的，用右手定则不一定能判定出来。例如，闭合圆形线圈中的磁场逐渐增强，用右手定则就无法判定感应电流的方向，因为此时并不切割磁力线；相反，用楞次定律可以很容易地判定出来。

需要注意的是：右手定则和左手定则不要混淆，两个定则的应用可简单地总结为："因电而动用左手；因动而电用右手"。

四、电磁感应现象中能量的转化

在电磁感应现象中，产生感应电动势的那部分导体相当于电源，如前面实验一（见图 5-44）中的导体 ab、实验二（见图 5-45）的线圈，实验三（见图 5-47）中的螺线管 B，对外电

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

路来说，都相当于电源。如果使外电路闭合，在感应电动势的作用下就有了感应电流，这时电流做功消耗了电能。由于能量不能无中生有，只能从一种形式转化成另一种形式，各种电源都是把其他形式的能转化成电能的装置，电磁感应现象中的电能是怎样转化而来的呢？

在图 5-45 所示的实验二中，按照楞次定律，感应电流总要阻碍磁铁相对于线圈的运动。把磁铁移近线圈时，磁铁受到斥力，必须有外力克服这种斥力做功，才能把磁铁移近；让磁铁离开线圈时，磁铁受到引力，也必须有外力克服这种引力做功，才能使磁铁离开。外力克服这种电磁的引力或斥力做功的过程中，外部的机械能就转化为感应电流的电能。在图 5-44 所示的实验一中，导线 ab 切割磁力线运动时，按照楞次定律，感应电流也要阻碍导线相对于磁铁的运动，例如当导线 ab 向右运动时，感应电流在磁场中所受的安培力，方向是向左的，外力克服安培力做功的过程中，外部的机械能就转化为感应电流的电能。从这里也可以看到，楞次定律与能的转化和守恒定律是相符的。

阅读材料：动圈式话筒和磁带录音机

(1)动圈式话筒

会场里的扩音设备主要由话筒、扩音机、扬声器组成。话筒把声音变成微弱的电流，这种电流变化的规律和声音变化的规律相同，叫做音频电流。扩音机把音频电流放大，扬声器再把电流变成洪亮的声音。

有一种动圈式话筒，是按照电磁感应的原理工作的。图 5-52 是动圈式话筒的构造原理图，当声波使膜片振动时，连在膜片上的线圈(叫做音圈)随着一起振动，线圈中的导线切割磁感线，电路中产生感应电流，这样声音信号就变成电信号了。

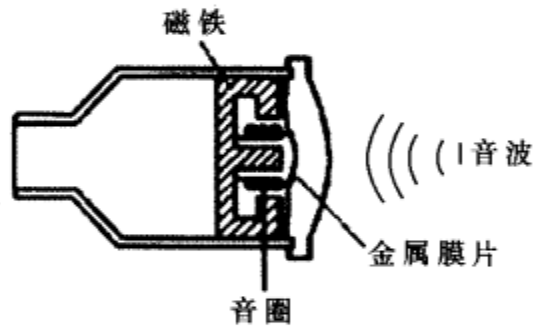


图 5-52　动圈式话筒

(2)磁带录音原理

图 5-53(a)是录音、放音原理的示意图，话筒把声音变成音频电流，放大后送到录音磁头。录音磁头实际上是个蹄形电磁铁，两极相距很近，中间只留个狭缝，整个磁头封在金属壳内。录音磁带的带基上涂着一层磁粉，实际上就是许多磁性小颗粒。磁带紧贴着录音磁头走过，音频电流使得录音头缝隙处磁场的强弱、方向不断变化，磁带上的磁粉也就被磁化成一个个磁极方向和磁性强弱各不相同的“小磁铁”，如图 5-53(b)所示，声音信号就这样记录在磁带上了。

放音头的结构和录音头相似，当磁带从放音头的狭缝前走过时，磁带上“小磁铁”产生的磁场穿过放音头的线圈。由于“小磁铁”的极性和磁性强弱各不相同，它在线圈内产生的磁通量也在不断变化，于是在线圈中产生感应电流，放大后就可以在扬声器中发出声音。普通录音机的录音和放音往往合用一个磁头。

例 14：如图 5-54 所示，矩形线框 abcd 在匀强磁场中绕与 B 垂直的 ab 边以角速度 ω 匀速转动，设 ad 为 L_1，cd 为 L_2，线框从图示位置转过 90°，在这段时间内，求线框产生的平均感应电动势和瞬时感应电动势。

解：①求平均感应电动势。

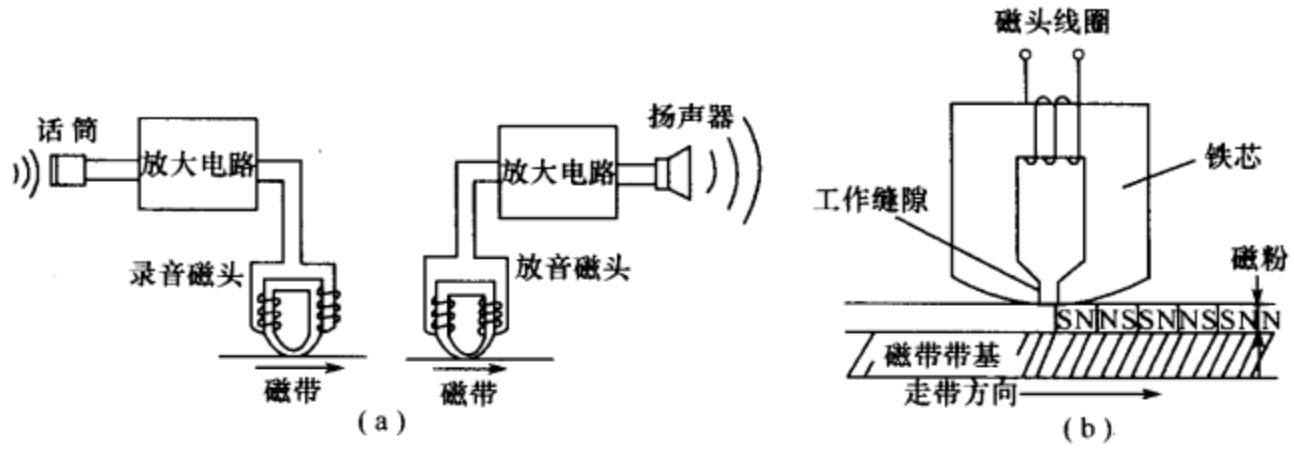


图 5-53　磁带录音原理

(a)录音机录音和放音的原理；(b)录音磁头的工作原理。

根据法拉第电磁感应定律，线框产生的平均感应电动势为

$$E=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=\frac{\Phi_2-\Phi_1}{\frac{1}{4}T}=\frac{BL_1L_2-0}{\frac{1}{4}\times\frac{2\pi}{\omega}}=\frac{2BS\omega}{\pi}$$

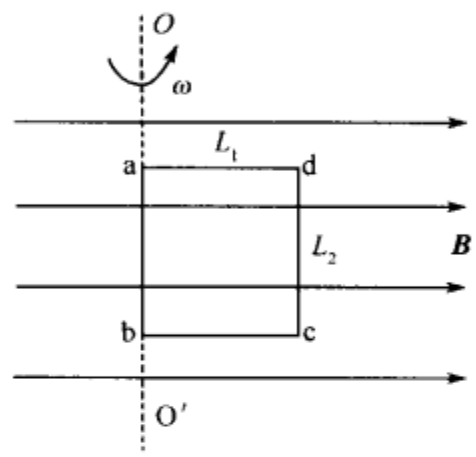


图 5-54　例 14 电磁感应图

线框从图中所示位置转过 90°的过程中，线框虽绕 ab 边匀速转动，但穿过线框的磁通量的变化却是不均匀的，线框内产生的感应电动势 E 是在不断变化的，上式只代表上述过程始末状态下磁通量改变量与所花时间的比值，即平均感应电动势。

②求瞬时感应电动势。

在图中所示位置，线框中只有 dc 边垂直切割磁感线，切割速度为：

$$v=\omega L_1$$

此一瞬间，线框产生的瞬时感应电动势为：

$$E=BL_2v=B\omega L_1L_2$$

例 15：如图 5-55 所示，长为 L 的铜杆 OA 以 O 为轴在垂直于匀强磁场的平面内以角速度 ω 匀速转动，磁场的磁感应强度为 B，求杆 OA 两端的电势差。

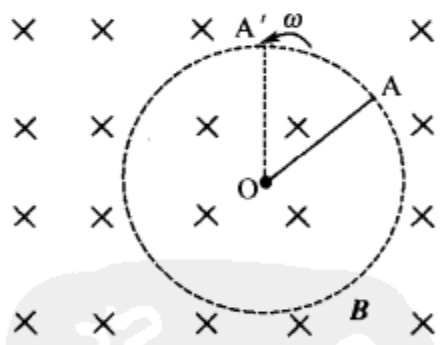


图 5-55　例 15 电磁感应图

解：铜杆 OA 在匀强磁场中做切割磁感线运动，将产生感应电动势 E，此即 OA 杆两端的电势差。

OA 杆匀速转动时，杆上各点运转半径不同，线速度大小不同，由 $v=\omega r$ 知，线速度 v 与半径 r 成正比。可见感应电动势从 A 至 O 是逐段均匀减小的，能够用平均值来计算 OA 杆的感应电动势杆的平均速度为：

$$\bar{v}=\frac{v_G+v_A}{2}=\frac{0+\omega L}{2}=\frac{1}{2}\omega L$$

感应电动势为：

$$E=B\bar{L}v=BL\times\frac{1}{2}\omega L=\frac{1}{2}BL^2\omega$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

杆 OA 两端的电势差为：

$$U_{OA}=E=\frac{1}{2}BL^2\omega$$

本题亦可用法拉第电磁感应定律求解，设杆 OA 经过时间 Δt，从 OA 位置转至 OA′ 位置，杆扫过的扇形面积为：

$$\Delta S=\frac{1}{2}\omega\Delta t\cdot L^2$$

此面积对应的磁通量变化量为：

$$\Delta\Phi=B\cdot\Delta S=\frac{B}{2}\omega\cdot\Delta t\cdot L^2$$

所以，感应电动势平均值为：

$$E=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=\frac{1}{2}BL^2\omega$$

由于 OA 杆在任意时刻产生的感应电动势都相同，且 OA′位置为任取的，可见，平均感应电动势也就是每个时刻的瞬时感应电动势，因此，杆 OA 两端电势差为：

$$U_{OA}=E\,\frac{1}{2}BL^2\omega$$

例 16：如图 5-56 所示，半径为 r 的金属环绕通过某直径的轴 OO′以角速度 ω 做匀速转动，匀强磁场的磁感应强度为 B，从金属环面与磁场方向重合时开始计时，则在金属环转过 30°角的过程中，环中产生的电动势的平均值是多大？

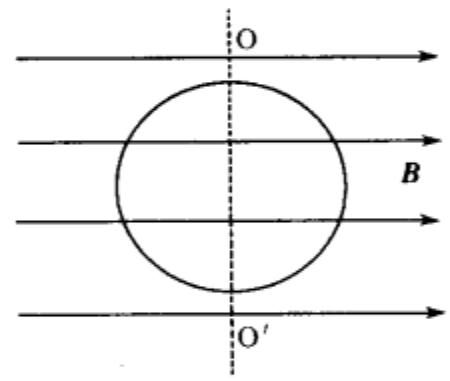


图 5-56　例 16 电磁感应图

解：根据金属环在磁场中转动的始末位置穿过环的磁通量 Φ_1、Φ_2 和完成这一变化所用时间为 Δt，就可以求出环中产生的感应电动势 $E=(\Phi_2-\Phi_1)\Delta t$。

当金属环面与磁感线平行时，穿过环的磁通量 $\Phi_1=0$；当环转过 30°时，环平面在垂直磁感线方向的投影为：

$$S_\perp=S\sin30^\circ=\frac{1}{2}S$$

穿过环的磁通量为：

$$\Phi_2=BS_\perp=B\cdot\frac{1}{2}S=\frac{1}{2}BS$$

所以，在环转过 30°的过程中，环中平均感应电动势为：

$$E=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=\frac{\Phi_2-\Phi_1}{\theta/\omega}=\frac{\frac{1}{2}BS-0}{\frac{\pi}{6}/\omega}=\frac{\frac{1}{2}B\times\pi r^2}{\frac{\pi}{6}/\omega}=3Br^2 3\omega$$

例 17：如图 5-57 所示，把线框 abcd 从磁感应强度为 B 的匀强磁场中匀速拉出，速度

方向与 ab 边垂直向右，速度的大小为 V，线圈的边长为 L，每边的电阻为 R，问：线圈在运动过程中，ab 两点的电势差为多少？

解：当整个线框 abcd 在磁场的时候，穿过线圈的磁通量不变，无感应电流，ab 和 cd 两边切割磁感线，等效电路图如图 5-58(a)所示。

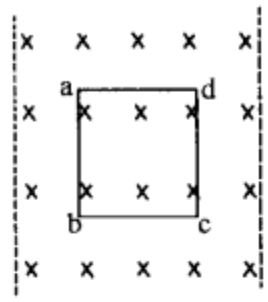


图 5-57　例 17 图

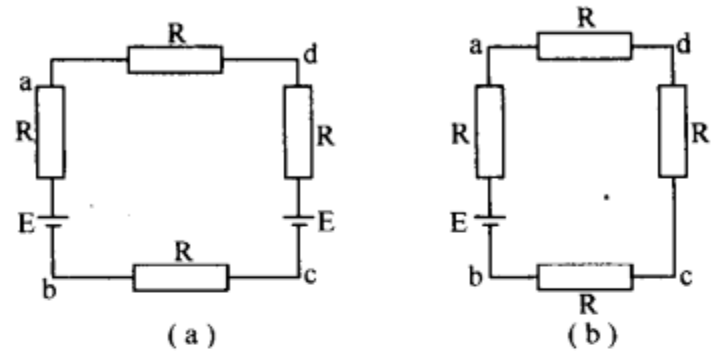


图 5-58　等效电路

$$U_{ab}=E=BLV$$

当 cd 边离开磁场，ab 边切割磁感线时，ad、bc、cd 边的电阻属于外电阻，等效电路图如图 5-58(b)所示。

根据闭合电路欧姆定律：

$$U_{ab}=E-Ir=BLV-\frac{E}{R+3R}R=BLV-\frac{BLV}{4}=\frac{3}{4}\ BLV$$

例 18：如图 5-59 所示，小灯泡的规格为“2V、4W”，接在光滑水平导轨上，轨距 0.1m，电阻不计。金属棒 ab 垂直搁置在导轨上，电阻 1Ω，整个装置处于磁感强度 $B=1$T的匀强磁场中。求：①为使小灯正常发光，ab 的滑行速度多大？②拉动金属棒 ab 的外力功率多大？

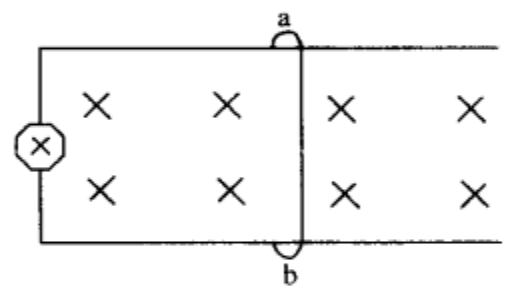


图 5-59　例 18 图

解：为使小灯正常发光，灯两端电压应等于其额定值 2V，这个电压是金属棒滑动时产生的感应电动势提供的，金属棒移动时，外力的功率转化为全电路上的电功率。

①根据小灯的规格得小灯的额定电流和电阻分别为：

$$I=\frac{P}{U}=\frac{4}{2}=2(\mathrm{A})$$

$$R=\frac{U^2}{P}=\frac{2^2}{4}=1(\Omega)$$

设金属棒滑行速度为 v，它产生的感应电流为：

$$I_{感}=\frac{Blv}{R+r}$$

式中 r 为棒的电阻。由 $I_{感}=I$，即得

$$\frac{Rlv}{R+r}=I$$

所以

$$v=\frac{I(R+r)}{Bl}=\frac{2(1+1)}{1\times 0.1}=40(\mathrm{m/s})$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

(2)根据能的转换,外力的机械功率等于整个电路中的电功率,所以拉动 ab 做切割运动的功率为:

$$P_{机}=P_{电}=I^2(R+r)=2^2(1+1)=8(\mathrm{W})$$

例 19:如图 5-60 所示,一导体圆环套在水平光滑杆 ab 上,当把条形磁铁插向圆环(靠近圆环磁极为 N 极)时,圆环将发生怎样的运动?如把条形磁铁抽出时,圆环又将发生怎样的运动?

解:当条形磁铁插向圆环时将引起圆环内磁通量的变化,继而在圆环内产生感应电流;而带电流的圆环要受到条形磁铁的磁场力作用,发生运动状态的改变。

当磁铁插向圆环时,圆环内向左的磁通量增加;圆环感应电流的磁通量阻碍它的增加,故感应电流的磁通量向右,形成电流后的圆环,用安培定则可判定圆环电流右端磁极为 N 极,根据同名磁极相互排斥,得出:圆环将向左加速运动。

当条形磁铁抽出时,圆环内向左的磁通量减少,圆环感应电流的磁通量阻碍它的减少,感应电流的磁通量向左,圆环电流磁场右端为 S 极,异名磁极相互吸引,得出:圆环将向右加速运动。

重点提示:通电的线圈相当于一个磁铁,或磁铁相当于一个通电的线圈,如图 5-61 所示。

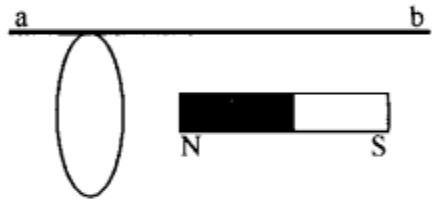


图 5-60　例 19 图



图 5-61　线圈和磁铁的等效

(a)通电的线圈等效于一个磁铁;(b)磁铁等效于一个通电的线圈。

例 20:如图 5-62 所示,水平面上有两根平行导轨,上面放两根金属棒 a、b。当条形磁铁向下移动时(不到达导轨平面),a、b 将如何移动?

解:磁铁向下插时,通过闭合回路的磁通量增大,由 $\Phi=BS$ 可知,磁通量有增大的趋势,因此,S 的相应变化应该使磁通量有减小的趋势,所以 a、b 将互相靠近。

例 21:如图 5-63 所示,用丝线悬挂闭合金属环,悬于 O 点,虚线左边有匀强磁场,右边没有磁场。金属环的摆动会很快停下来,试解释这一现象。若整个空间都有向外匀强磁场,会有这种现象吗?

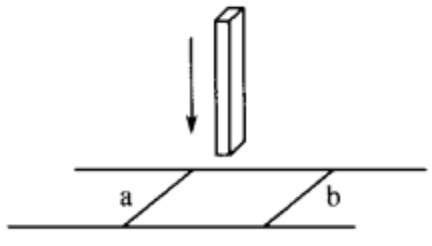


图 5-62　例 20 图

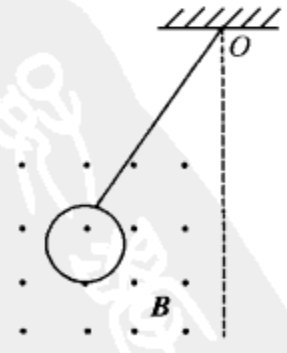


图 5-63　例 21 图

解:只有左边有匀强磁场,金属环在穿越磁场边界时,由于磁通量发生变化,环内一定会有感应电流产生。根据楞次定律,将会阻碍相对运动,所以摆动会很快停下来,这就是

电磁阻尼现象。

当然也可以用能量守恒来解释：既然有电流产生，就一定有一部分机械能向电能转化，最后电流通过导体转化为内能。若空间都有匀强磁场，穿过金属环的磁通量没发生变化，因此不产生感应电流，也就不会阻碍相对运动，摆动就不会很快停下来。

五、自感

1. 自感现象

由前面的分析中已经知道，穿过闭合电路的磁通量发生变化时，电路中会产生感应电动势，磁通量是由磁铁或者其他通电线圈产生的，那么，如果闭合电路中的磁通量是由这个电路本身产生的，当磁通量变化时，这个电路中也会产生感应电动势吗？现在来研究这种现象。

把小灯泡 A_1 和带铁芯的线圈 L 串联起来接到电源上，如图 5-64(a)所示，可以看到，在闭合开关的瞬间，灯泡没有立即达到正常亮度，而是逐渐亮起来，这和没有线圈的时候不一样。为了进行对比，再接上一个相同的灯泡 A_2，如图 5-64(b)所示，调整变阻器 R，使正常发光时两个灯泡的亮度相同。断开电路，重新闭合开关，可以清楚地看到，A_1 达到正常亮度所用的时间明显比 A_2 长。这种现象是由线圈 L 自身的电磁感应引起的。开关闭合时，电流由零开始增大，因而线圈中必然产生感应电动势，由于灯泡 A_1 是逐渐亮起来的，所以能够判断，当线圈中的电流增加时，感应电动势阻碍电流的增加。

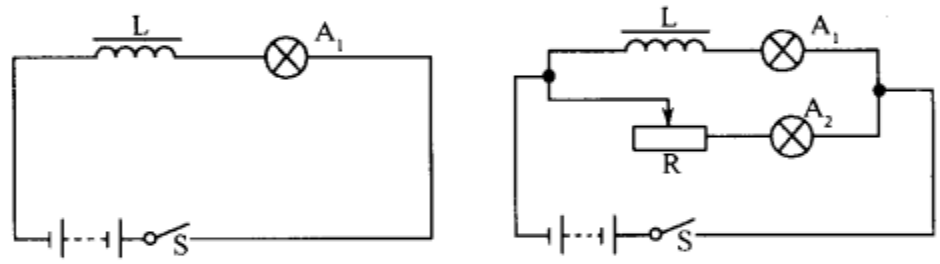


图 5-64　自感实验——开关闭合时

这种由于导体本身的电流发生变化而产生的电磁感应现象，叫做自感现象，自感现象中产生的感应电动势，叫做自感电动势。

如果电路中的电流减小，也会产生自感电动势，这可以从图 5-65 的实验中看出来。

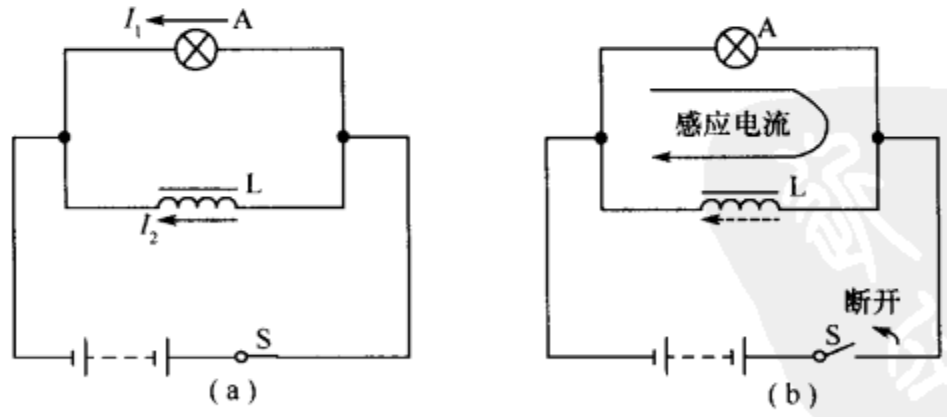


图 5-65　自感实验——开关断开时

电路通路时流过灯泡 A 和线圈 L 的电流方向如图 5-65(a)所示，开关断开时灯泡没有立即熄灭，相反，灯泡会很亮地闪一下。这表明，线圈中的电流减小时，自感电动势阻碍电流的减小，甚至可能在瞬间有更大的电流通过灯泡。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

线圈中有电流时，线圈内部和它的周围有磁场，磁场也有能量。因此，当电流减小时，磁场能量就通过灯泡转化成灯丝的内能和它辐射的光能了。

2. 自感系数

自感电动势和其他感应电动势一样，是与穿过线圈的磁通量的变化率$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$成正比的，由于磁通量 $\Delta\Phi$ 与磁感应强度 B 成正比，B 又与产生这个磁场的电流 I 成正比，所以，Φ 与 I 成正比，$\Delta\Phi$ 与 ΔI 也成正比。由此可知，自感电动势 $e_L=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$与$\frac{\Delta I}{\Delta t}$成正比，即

$$e_L=L\frac{\Delta I}{\Delta t} \tag{5-13}$$

式中的比例恒量 L 叫做线圈的自感系数，简称自感或电感，它是由线圈本身的特性决定的。线圈越长，单位长度上的匝数越多，截面积越大，它的自感系数就越大。另外，有铁芯的线圈的自感系数，比没有铁芯时要大得多。自感系数的单位是亨利，简称亨，符号是 H。如果通过线圈的电流强度在 1s 内改变 1A 时产生的自感电动势是 1V，这个线圈的自感系数是 1H，所以

$$1\text{H}=1\text{V}\cdot\text{s/A}$$

常用的较小单位有毫亨(mH)和微亨(μH)。

$$1\text{mH}=10^{-3}\text{H},1\mu\text{H}=10^{-6}\text{H}$$

对于一个现成的线圈，自感系数是一定的。例如，有一密绕的长线圈，其截面积为 S(m^2)，长度为 l(m)，匝数为 N，介质磁导率为 μ(H/m)，则其电感 L(H)为：

$$L=\frac{\mu SN^2}{l} \tag{5-14}$$

3. 电感元件

电子电路、家用电器中的电感器可分为两大类：应用自身自感作用的电感元件；应用互感作用的变压器。电感元件也称电感器或电感线圈，它与电阻器和电容器一样，是电子电路中最基本的元器件。

(1)电感的定义

电感是一种线圈，随着流过线圈电流的变化，线圈内部会感应某个方向的电压，以反映通过线圈的电流变化。电感两端的电压与通过电感的电流有以下关系：$e_L=L\frac{\Delta I}{\Delta t}$。

(2)电感的分类

电感按使用特征可分为固定和可调两种；按磁芯材料可分为空心、磁芯和铁芯等；按结构可分为小型固定电感、平面电感以及中周。电感器在使用中常按工作频率高低来划分，高频电感线圈的特点是电感量较小，用于工作频率比较高的电路中；低频扼流圈，又称低频阻流圈，它主要用在低频(音频)电路中，电感量较大。

(3)电路符号

如图 5-66 所示是电感器的电路符号。

图 5-66(a)所示是电感线圈的一般电路符号，表示线圈中不含磁芯，在电路符号中电感器用 L 表示；图 5-66(b)所示是有磁芯电感器的电路符号，以实线来表示磁芯；图 5-66(c)表示有磁芯且电感量可在一定范围内连续调整，又称为微调电感。图 5-66(d)表



图 5-66　电感器的电路符号

示无磁芯但有一个抽头的电感器。

(4)电感器的结构

电感器是根据自感现象制作的电子元件，最简单的电感线圈就是用导线空心地绕几圈，如图 5-67(a)所示。图 5-67(b)所示是有磁芯的电感器结构示意图，它也用导线绕几圈，但绕在磁芯上。无论哪种电感器，都是用导线绕几圈，虽然绕的匝数不同，有无磁芯的电感量大小不同，但电感器的特性相同。

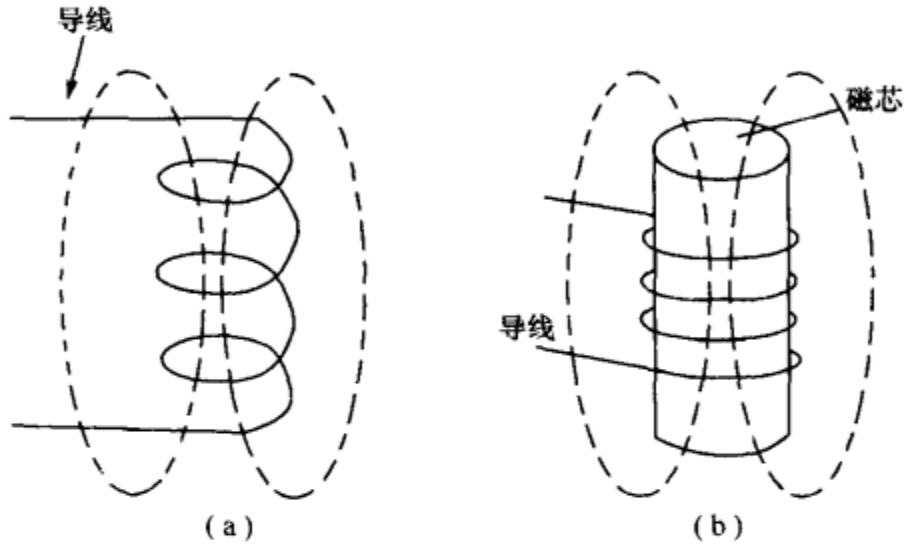


图 5-67　电感器的基本结构

(5)电感器的感抗

电感器对流过它的交流电流存在着阻碍作用，即存在感抗，感抗同电阻类似。电感器的感抗大小与电感量大小和频率高低有关。实验发现，线圈的感抗 x_L 与电感 L 和频率 f 成正比。进一步研究指出，线圈的感抗 X_L 与电感 L 和交流电的频率 f 之间有如下的关系：

$$X_L = 2\pi fL \tag{5-15}$$

式中：X_L 为电感器的感抗，f 为通过电感器的交流电流的频率，L 为电感器的电感量。单位分别为欧姆(Ω)、赫兹(Hz)、亨利(H)。

为什么线圈的感抗与线圈的自感系数(电感量)和交流电的频率有关呢？感抗是由自感现象引起的，线圈的电感(自感系数)L 越大，自感作用就越大，因而感抗越大；交流电的频率 f 越高，电流的变化率越大，自感作用也越大，因而感抗越大。

需要说明的是，对于直流电，由于 $f=0$，所以电感呈通路，只存在线圈本身很小的直流电阻，可以忽略不计；对于交流电，电感则存在着阻碍作用，此时，感抗远大于电感器直流电阻对交流电流的阻碍作用，可以忽略直流电阻对交流电流的影响。

(6)电感器的特性

①电励磁特性。

当电流流过电感器时，要在电感器四周产生磁场。无论是直流电还是交流电流过线圈时，在线圈内部和外部周围都要产生磁场，其磁场的大小和方向与电流的特性有关。

当直流电流通过线圈时，产生一个方向不变和大小不变的磁场，磁场大小与直流电流

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

的大小成正比，磁场方向可用安培定则（右手螺旋定则）判定。当直流电流的大小改变时，磁场强度也随之改变，但磁场方向始终不变。

当线圈中流过交流电流时，磁场的方向仍用安培定则判定。由于交流电流本身的方向在不断改变，所以磁场的方向也在不断改变。由于交流电的大小也不断变化，所以磁场的大小也在不断改变，这样给线圈通入交流电流后，线圈产生的磁场是一个交变磁场，其磁场强度仍与交流电流的大小成正比关系。

从线圈的上述特性中可以知道，线圈能够将电能转换成磁能，因此可以利用线圈的这一特性制作换能器件。例如，录音机中的录音磁头就是利用这一原理制成的。

②磁励电特性。

线圈不仅能将电能转换成磁能，还能将磁能转换成电能。当通过线圈的磁通量改变时，线圈在磁场的作用下要产生感应电动势，这是线圈由磁励电的过程。磁通量的变化率愈大，其感应电动势愈大。当磁场的大小和方向在不断变化时，感应电动势的大小和方向也在不断变化。

当线圈在一个恒定磁场中时，线圈中无磁通量的变化，线圈不能产生感应电动势。这一点就不同于线圈由电励磁时，通入直流电也能产生方向恒定的磁场。

可以利用线圈的磁励电特性制作换能器件。如动圈式话筒、放音磁头等，它们都是将磁能转换成电能的换能器件。

③线圈中的电流不能发生突变。

当流过线圈的电流大小发生改变时，线圈要产生一个反电动势来维持原电流的大小不变，线圈中的电流变化率愈大，其反电动势就愈大。

下面以图 5-68 为例，说明反电动势方向的判定方法。

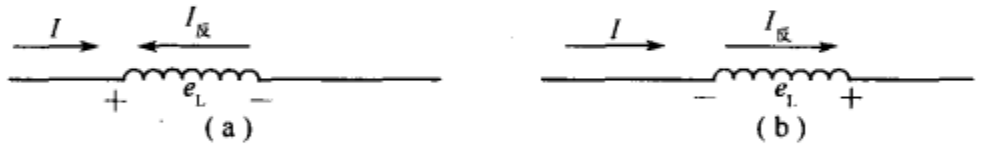


图 5-68　反电动势方向的判定方法

(a) I 增大；(b) I 减小。

设电路中的原电流为 I，其电流方向是从左向右流过线圈 L。当原电流 I 增大时，反电动势要阻碍这一电流的增大，这样可画出反电动势产生的反向电流 $I_{反}$ 方向为自右向左，与原电流 I 的方向相反。反电动势产生在线圈 L 的两端，L 是反电动势的内电路，在内电路中的电流从负极流向正极，外电路中的电流从正极流向负极，根据内电路中电流是从负极流向正极的原理，可画出 L 两端电动势的正负极性，即左端为正，右端为负，如图 5-68(a)所示。当原电流 I 减小时，反电动势要阻碍这一电流的减小，所以，反电动势产生的电流 $I_{反}$ 为自左向右，与原电流 I 方向相同。根据电流流入的方向，可以判别出此时的反电动势方向为左负右正。

(7)电感器串联和并联

电感器串联、并联电路不常见，这里对电感器串、并联后的总电感量作些说明。电感器串联后的总电感量为各串联电感器电感之和，即 $L=L_1+L_2+\cdots$，这一点与电阻的串联是相同的。电感器并联后总电感量的倒数等于各电感器电感倒数之和，即 $1/L=1/L_1+1/L_2+\cdots$，这与电阻的并联也是相同的。

4. 自感现象的应用

自感现象在各种电路设备和无线电技术中有着广泛的应用，日光灯的镇流器就是利用线圈自感现象的一个例子。

日光灯主要由灯管、镇流器和启动器组成。灯管的两端各有一个灯丝，管中充有稀薄的氩和微量水银蒸气，管壁上涂着荧光粉，灯管的工作原理和白炽灯不同，两个灯丝之间的气体在导电时主要发出紫外线，荧光粉受到紫外线的照射才发出可见光，荧光粉的种类不同，发光的颜色也不一样。日光灯结构如图 5-69 所示。电路图如图 5-70(a)所示。

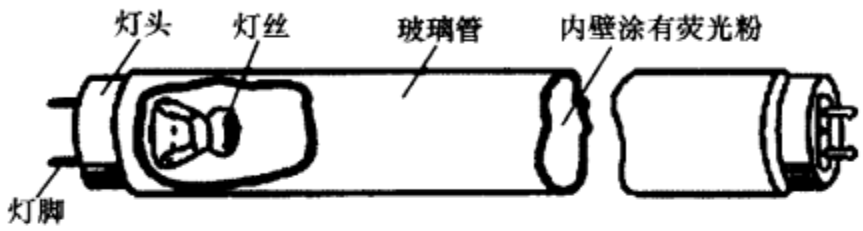


图 5-69　日光灯结构

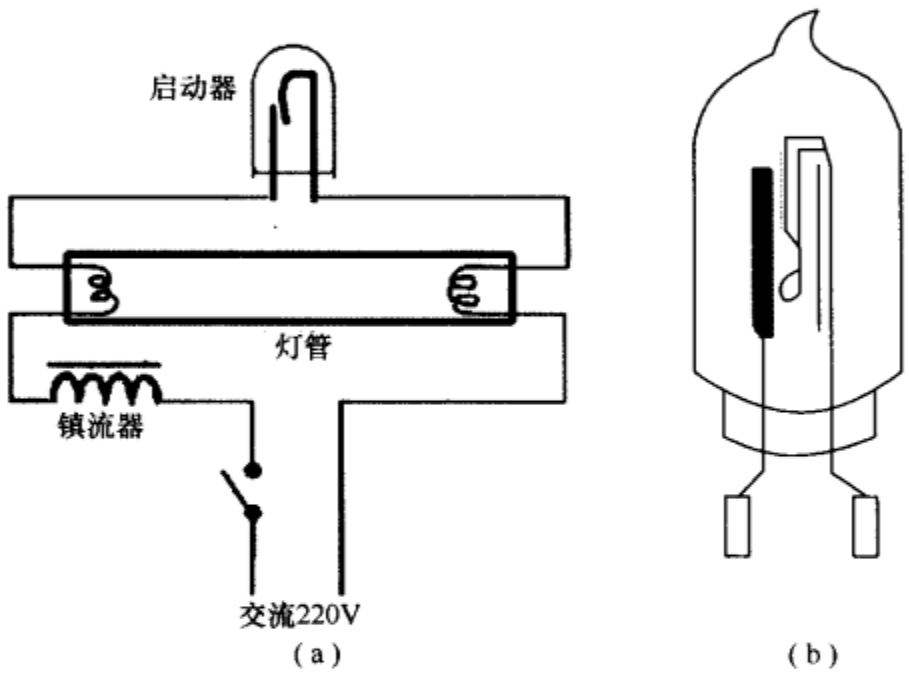


图 5-70　日光灯电路图

(a)日光灯电路；(b)启动器。

镇流器是一个带铁芯的线圈，启器的构造如图 5-70(b)所示，它是一个充有氖气的小玻璃泡，里面装有两个电极，一个固定不动的静触片和一个用双金属片制成的 U 形触片。灯管内充有稀薄的水银蒸气，当水银蒸气导电时，就发出紫外线，使涂在管壁上的荧光粉发出柔和的白光，由于激发水银蒸气导电所需的电压比 220V 的电源电压高得多，因此，日光灯在开始点燃时需要一个高出电源电压很多的瞬时电压，在日光灯点燃后正常发光时，灯管的电阻变得很小，只允许通过不大的电流，电流过强就会烧毁灯管，这时还要使加在灯管上的电压大大低于电源电压，这两方面的要求都是利用与灯管串联的镇流器来达到的。

当开关闭合后，电源把电压加在启动器的两极之间，使氖气放电而发出辉光，辉光产生的热量使 U 形触片膨胀伸长，和静触片接触而把电路接通，于是镇流器的线圈和灯管的灯丝中就有电流通过。电路接通后，启动器中的氖气停止放电，U 形触片冷却收缩，两个触片分离，电路自动断开，在电路突然中断的瞬间，镇流器中的电流急剧减小，产生很高

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

的感应电动势，感应电动势和电源电压叠加起来加在灯管两端的灯丝上，把灯管点燃。实际使用的启动器中常有一个电容器并联在氖泡的两端，它能使两个触片在分离时不产生火花，以免烧坏触点，同时还能减轻对附近无线电设备的干扰，没有电容器时启动器也能工作。

家里照明用的电源是交流电，它的大小和方向都在不停地变化，镇流器中的自感电动势阻碍电流的变化，使得流过灯管的电流不致过大。

自感现象也有不利的一面，在自感系数很大而电流又很强的电路（如大型电动机的定子绕组）中，在切断电路的瞬间，由于电流强度在很短的时间内发生很大的变化，会产生很高的自感电动势，使开关的闸刀和固定夹片之间的空气电离而变成导体，形成电弧，这会烧坏开关，甚至危及工作人员的安全。因此，切断这类电路时必须采用特制的安全开关，常见的安全开关是将开关放在绝缘性能良好的油中，防止电弧的产生，保证安全。

例 22：在如图 5-71 所示的电路中，电阻 R 和自感线圈 L 的电阻值都很小，接通 K，使电路达到稳定，分析当断开开关 K 时，灯泡 S 的发光情况。

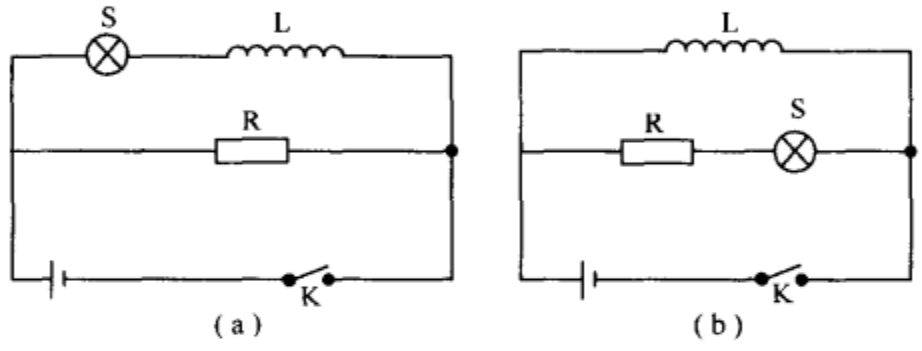


图 5-71　例 22 图

解：当断开 K 时，线圈 L 相当于电源，产生了自感电动势，在 L、R、S 回路中产生自感电流。在电路(a)中，L 中的自感电流逐渐减小，灯泡 S 逐渐变暗；在电路(b)中，L 中的自感电流逐渐减小，因为 L 中的自感电流大于灯泡中的电流，所以灯泡 S 先变得更亮，之后渐渐变暗。

重点提示：图(a)电路中灯泡 S 和自感线圈 L 串联在一起，通过两者的电流大小一样，而图(b)电路中稳定时通过 L 的电流要远远大于通过灯泡 S 的电流。当断开 K 时，L 中产生自感电动势，L、S、R 构成新的回路，在这个回路中，对图(a)、图(b)两电路而言，自感电动势不同，灯泡 S 的始态电流不同，因此变化的情况也不同。

例 23：如图 5-72 所示，D_1、D_2 是两个相同的小电灯，L 是一个自感系数很大的线圈，其阻抗与 R 相同，由于存在自感现象，在电键接通和断开时，分析两灯泡先后亮暗的次序。

解：当电键 S 接通时，D_1 和 D_2 应该同时亮，但是由于自感现象的存在，通过线圈的电流从零开始变大，线圈上产生的自感电动势的方向是左边正极，右边负极，使通过线圈的电流从零开始慢慢增加，所以开始瞬间电流几乎全部从 D_1 通过，而该电流又将同时分路通过 D_2 和 R，所以 D_1 最亮。经过一段时间电流稳定以后，D_1 和 D_2 达到一样亮。

当电键 S 断开时，电源的电流立即为零，因此 D_2 立即熄灭，而对 D_1，由于通过线圈的电流突然减弱，线圈中产生的电动势右边正极，左边负极，使线圈 L 和 D_1 组成的闭合电路中有感应电流，所以 D_1 后灭。综合以上可知：接通时 D_1 先达最亮，断开时 D_1 后暗。

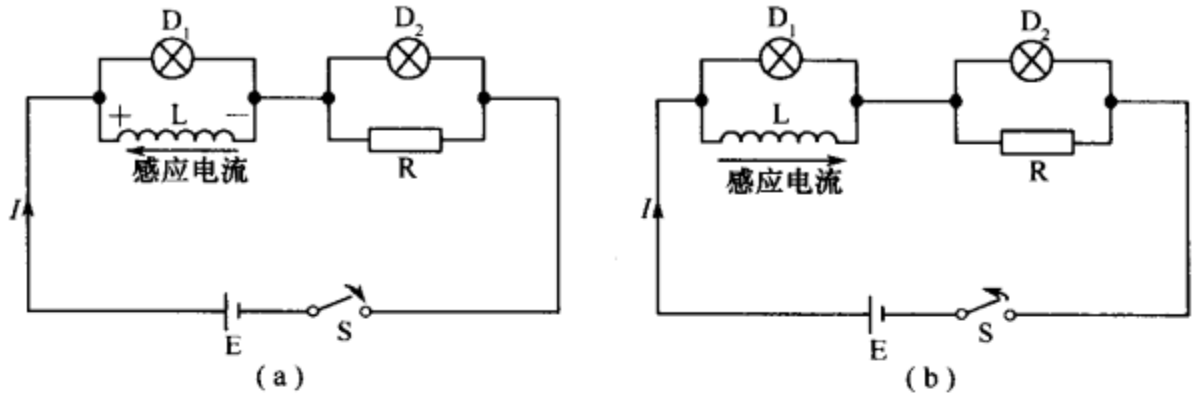


图 5-72　例 23 图

(a)接通时；(b)断开时。

例 24：如图 5-73 所示，多匝线圈 L 的电阻和电源内阻都很小，可忽略不计，电路中两个电阻器的电阻均为 R，开始时电键 S 断开，此时电路中电流强度为 I，现将电键 S 闭合，分析电流 I 的变化情况。

解：当电键 S 闭合时，通过线圈的电流发生变化，在线圈中产生自感电动势，自感电动势阻碍电流的变化，但“阻碍”不是“阻止”。“阻碍”实质上是“延缓”，虽然自感电动势能“延缓”电流的变化，但电流还是要变化的。

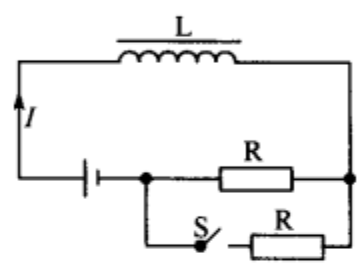


图 5-73　例 24 图

在电键 S 闭合后，由于自感电动势阻碍电流的增大，电流中的电流不会立刻变为 $2I$，但最终仍会增大到 $2I$。

例 25：如图 5-74 所示图中，a、b 灯分别标有“36V 40W”和“36V 25W”，闭合电键 S，调节 R，能使 a、b 都正常发光。断开电键 S 后，重做实验，电键闭合后看到的现象是什么？稳定后哪只灯较亮？再断开电键，又将看到什么现象？

解：闭合瞬间，由于电感线圈对电流增大的阻碍作用，a 将慢慢亮起来，b 立即变亮。这时 L 的作用相当于一个大电阻；稳定后两灯都正常发光，a 的功率大，较亮，这时 L 的作用相当于一只普通的电阻(就是该线圈的内阻)。

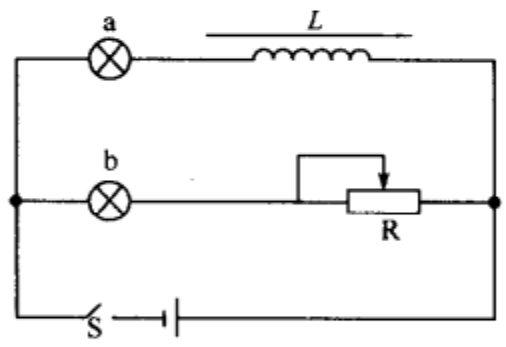


图 5-74　例 25 图

断开瞬间，由于电感线圈对电流减小的阻碍作用，通过 a 的电流将逐渐减小，a 渐渐变暗到熄灭，而 a、b、R、L 组成同一个闭合回路，所以 b 灯也将逐渐变暗到熄灭，而且开始还会闪亮一下(因为原来有 $I_a > I_b$)，并且通过 b 的电流方向与原来的电流方向相反，这时 L 相当于一个电源。

六、涡流

仔细观察发电机、电动机和变压器，可以看到它们的铁芯都不是整块金属，而是用许多薄的硅钢片叠合而成的。为什么要这样呢？

原来，把块状金属放在变化的磁场中，或者让它在磁场中运动时，金属块内将产生感应电流。这种电流在金属块内自成闭合回路，很像水的旋涡，因此叫做涡电流，简称涡流。整块金属的电阻很小，所以涡流常常很强。

如图 5-75 所示，在块状铁芯上绕绝缘导线，当交流电通过导线时，穿过铁芯的磁通量

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

不断变化，铁芯中就会产生如图中虚线所示的涡流。块状铁芯中的涡流很强，这将使铁芯大量发热，浪费大量的电能，因此用整块铁芯的电机和变压器，涡流损失很大，效率很低。为了减少涡流损失，电机和变压器通常用涂有绝缘漆的薄硅钢片叠压制成的铁芯，这样涡流被限制在狭窄的薄片之内，回路的电阻很大，涡流大为减弱，从而使涡流损失大大降低。铁芯采用硅钢片，是因为这种钢比普通钢的电阻率大，可以进一步减少涡流损失，硅钢的涡流损失只有普通钢的 1/5～1/4。

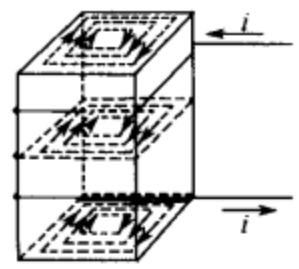


图 5-75　涡流现象

在各种电机、变压器中，涡流是有害的，要采取各种办法减弱它。但是，涡流也是可以利用的，例如冶炼金属的高频感应炉，就是利用涡流来熔化金属的。冶炼锅内装入被冶炼的金属，让高频交流电通过线圈，被冶炼的金属中就产生很强的涡流，从而产生大量的热使金属熔化。这种冶炼方法速度快，温度容易控制，并能避免有害杂质混入被冶炼的金属中，因此适于冶炼特种合金和特种钢。再如，电学测量仪表要求指针的摆动很快停下来，以便可以迅速读出读数。制作电流表时，电流表的线圈要绕在铝框上，铝框就是起这个作用的。当被测电流通过线圈时，线圈带动指针和铝框一起转动，铝框在磁场中转动时产生涡流，磁场对这个涡流的作用力阻碍它们的摆动，于是使指针很快地稳定在指到的读数位置上。

归纳总结：电磁知识小结

为便于读者对电磁现象有一个全面认识，表 5-2 对电磁知识进行了归纳和总结。

表 5-2　电磁知识小结

主要知识	具体内容	说　明
磁场	运动电荷周围存在的物质，能对铁类物质及运动电荷产生力的作用	一切磁现象的本质，来源于电荷的运动
磁感应强度 B	$B=F/LI$ B 的方向与 F、L 所在平面垂直	F 是当 $L\perp B$ 时受到的最大磁场力
磁通量 Φ	$\Phi=BS\cos\theta$	θ 是 S 与磁感应强度垂直方向的夹角
安培力 F	$F=BIL\sin\theta$，磁场对通电导体的作用力	θ 是 B 与电流正方向的夹角
洛仑兹力 f	$f=qvB\sin\theta$，磁场对运动电荷的作用力	θ 是 B、v 正方向的夹角
动生电动势	$E=BLv\sin\theta$，一段导体因切割磁感线而产生的感应电动势	θ 是 v 与 B 正方向的夹角（L 与 B 垂直）
感应电动势	$E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$，因磁通量发生变化而在闭合电路引起的感应电动势的代数和	n 是匝数，$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 叫做磁通量的变化率

第四节　磁性材料的性能

一、磁导率

磁导率是用来衡量物质导磁能力的物理量，其单位为亨/米（H/m）。实验测出，真空

中的磁导率为：$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{H/m}$。

因为这是一个常数，所以，将其他物质的磁导率与它比较是很方便的。任意一种物质的磁导率 μ 和真空中的磁导率 μ_0 的比值，称为该物质的相对磁导率 μ_r，即：

$$\mu_r = \mu / \mu_0$$

几种常用磁性材料的磁导率见表 5-3。

表 5-3　几种常用磁性材料的磁导率

材料名称	铸铁	硅钢片	镍锌铁氧体	锰锌铁氧体	坡莫合金
相对磁导率 $\mu_r = \mu/\mu_0$	200～400	7000～10000	10～1000	300～5000	2×10^4～2×10^5

对于非磁性材料而言，$\mu \approx \mu_0$，$\mu_r \approx 1$，差不多不具有磁化的特性，而且每一种非磁性材料的磁导率都是常数。

二、磁场强度

在任何磁介质中，磁场中某点的磁感应强度 B 与同一点的磁导率 μ 的比值称为该点的磁场强度 H，即：$H = B/\mu$。单位：安/米(A/m)。磁场强度 H 与磁感应强度 B 的名称很相似，切忌混淆。H 是为计算方便而引入的物理量。

三、磁性材料的磁性能

磁性材料主要是指铁、镍、钴及其合金，它们具有下列磁性能。

1. 高导磁性

磁性材料的磁导率很高，μ_r 远远大于 1，可达数百、数千、乃至数万之值。这就使它们具有被强烈磁化(呈现磁性)的特性。

为什么磁性物质具有被磁化的特性呢？因为磁性物质不同于其他物质，有其内部特殊性。我们知道电流产生磁场，在物质的分子中由于电子环绕原子核运动和本身自转运动而形成分子电流，分子电流也要产生磁场，每个分子相当于一个基本小磁铁。同时，在磁性物质内部还分成许多小区域；由于磁性物质的分子间有一种特殊的作用力而使每一区域内的分子磁铁都排列整齐，显示磁性，这些小区域称为磁畴。在没有外磁场的作用时，各个磁畴排列混乱，磁场互相抵消，对外就显示不出磁性来，如图 5-76(a)所示。当有外磁场(例如磁铁铁芯线圈中的励磁电流所产生的磁场)时，磁畴就顺外磁场方向转向，显示出磁性，随着外磁场的增强(或励磁电流的增大)，磁畴的磁场就逐渐转到与外磁场相同的方向上，如图 5-76(b)所示，这样便产生了一个很强的与外磁场同方向的磁化磁场，而使磁性物质内的磁感应强度大大增加。这就是说磁性物质被强烈地磁化了。

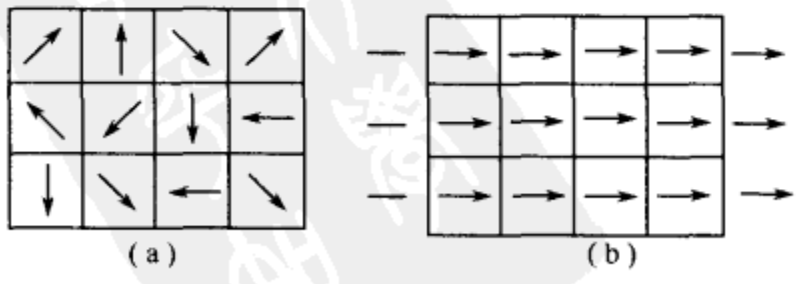


图 5-76　磁性物质的磁化

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

磁性物质的这一磁性能被广泛地应用于电工设备中，例如电机、变压器及各种铁磁元件的线圈中都放有铁芯。在这种具有铁芯的线圈中通入不大的励磁电流，便可产生足够大的磁通量和磁感应强度。这就解决了既要磁通量大，又要励磁电流小的矛盾。利用优质的磁性材料可使同一容量的电机的质量和体积大大减小。

非磁性材料没有磁畴的结构，所以不具有磁化的特性。

2. 磁饱和性

磁性物质由于磁化所产生的磁化磁场，不会随着外磁场的增强而无限地增强。当外磁场（或励磁电流）增大到一定值时，全部磁畴的磁场方向都转向与外磁场的方向一致。这时磁化磁场的磁感应强度 B 达到饱和值。

3. 磁滞性

当铁芯线圈中通有交变电流（大小和方向都变化）时，铁芯就受到交变磁化，在电流变化一次时，磁感应强度 B 随磁场强度 H 而变化的关系如图 5-77 所示。

由图可见，当 H 减到零值时，B 并未回到零值。这种磁感应强度滞后于磁场强度变化的性质称为磁性物质的磁滞性。

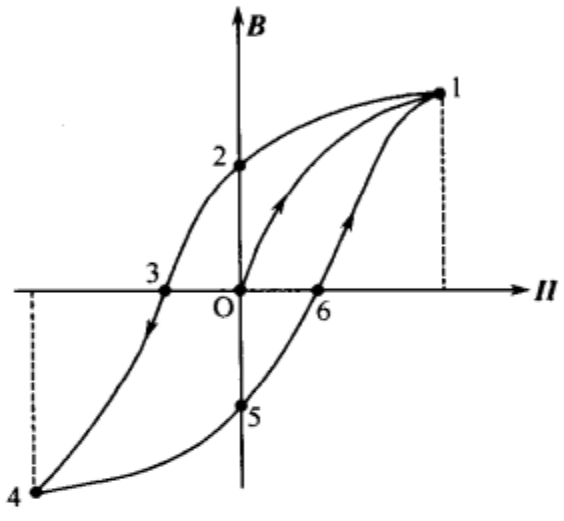


图 5-77　磁滞回线

当线圈中电流减到零值（即 $H=0$）时，铁芯在磁化时所获得的磁性还未完全消失，这时铁芯中所保留的磁感应强度称为剩磁感应强度 B_r（剩磁），在图 5-77 中即为纵坐标 O-2 和 O-5。永久磁铁的磁性就是由剩磁产生的。又如自励直流发电机的磁极，为了使电压能够建立，也必须具有剩磁。但对剩磁也要一分为二，有时它是有害的。例如，当工件在平面磨床上加工完毕后，由于电磁吸盘有剩磁，还将工件吸住，为此，要通人反向去磁电流，去掉剩磁，才能将工件取下。

如果要使铁芯的剩磁消失，通常改变线圈中励磁电流的方向，也就是改变磁场强度的方向来进行反向磁化。使 $B=O$ 的 H 值在图 5-77 中用 O3 和 O6 代表，称为矫顽磁力 H_C。

在铁芯反复交变磁化的情况下，表示 B 与 H 变化关系的闭合曲线 1234561 称为磁滞回线。磁性物质不同，其磁滞回线和磁化曲线也不同，这可由实验得出。

四、磁性材料的分类

实验表明，许多物质在磁场中都能或多或少地被磁化，只是磁化的程度不同。像铁那样能够被强烈磁化的物质叫做铁磁性物质，或称铁磁性材料。这样的物质磁化后，它们的磁性并不因外磁场的消失而完全消失，仍然剩余一部分磁性。

铁磁性材料按磁化后去磁的难易可分为软磁性材料和硬磁性材料。

软磁材料具有较小的矫顽磁力，磁滞回线较窄，磁化后容易去磁。软磁性材料适用于需要反复磁化的场合，可以用来制造变压器、交流发电机、电磁铁、录音机磁头等。半导体收音机中绕线圈的“磁棒”和各种高频元件的“磁芯”，就是用软磁性的铁氧体制作的。

硬磁材料具有较大的矫顽磁力，磁滞回线较宽，磁化后不容易去磁。一般用来制造永

久磁铁，常用的有碳钢、钨钢等。硬磁性材料适合制成永久磁铁，应用在磁电式仪表、扬声器、话筒等设备中。

随着社会的进步，磁性材料和我们日常生活的关系也越来越密切，录音带、录像带、计算机上用的磁盘、银行发行的信用卡、打电话用的磁卡等，都含有磁性材料，依靠这些磁性材料，人们可以在录音带、录像带、磁盘上保存大量信息，并能很方便地读出这些信息。用于磁记录的磁性材料在20世纪70年代以前采用磁性氧化物，1978年合金磁粉研制成功之后，开始采用金属磁性材料，从而大大提高了磁记录的性能。中、高档的录音机上有“金属带”和“普通带”的选择开关，就是为了适应这两种不同的磁性材料，现在人们正在试验把金属薄膜用做磁记录材料，如果试验成功，磁记录技术又会得到进一步提高。

*第五节　磁路及其基本定律

一、磁路的概念

如图5-78所示中，线圈绕在闭合的铁芯上时，由于铁芯的磁导率 μ 很大(数量级通常 $10^2 \sim 10^6$)，远远高于周围空气的磁导率，这就使绝大多数的磁通量集中到铁芯内部，并形成一个闭合通路。这种人为造成的磁通的路径，称为磁路。实质上，磁路就是局限在一定范围内的磁场，但与磁场问题相比，磁路问题则相对简单。

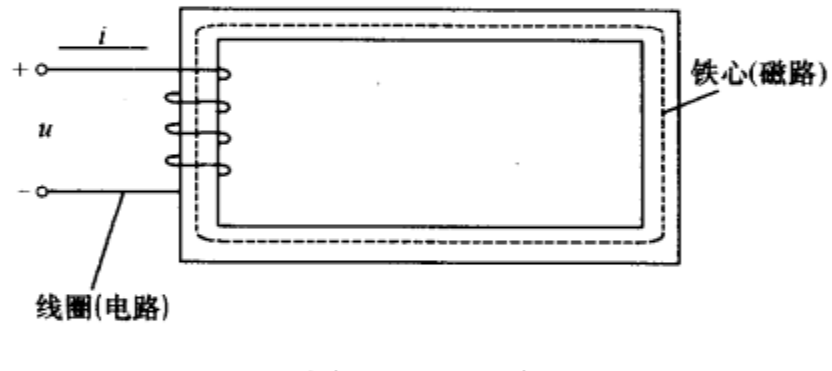


图5-78　磁路

二、磁路基本定律

1. 磁路欧姆定律

对于变压器的磁路而言，设磁路的截面积为 S，磁路的平均长度为 L，线圈匝数为 N，通电电流为 I，磁通为 Φ。经推导，有如下关系成立：

$$\Phi=\frac{F}{R_m} \tag{5-16}$$

式(5-16)称为磁路欧姆定律。其中，R_m 称为磁阻，其大小为 $R_m=\frac{L}{\mu S}$；F 称为磁动势，其大小为 $F=NI$。

由磁路欧姆定律知，Φ 与磁动势 F 有关，还与磁阻 R_m 有关；而 R_m 不仅取决于磁路的几何尺寸，还与磁路的磁导率有关。

2. 磁路基尔霍夫定律

对于分支磁路，如图5-79所示，有如下关系成立：

$$\Phi_1=\Phi_2+\Phi_3 \text{或} \sum \Phi_k=0 \tag{5-17}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$NI = H_1L_1 + H_3L_3 \text{或} \sum NI = \sum HL \tag{5-18}$$

式中，H_1表示 CDA 段的磁场强度，L_1为该段的平均长度；H_3表示 ABC 段的磁场强度，L_3为该段的平均长度。

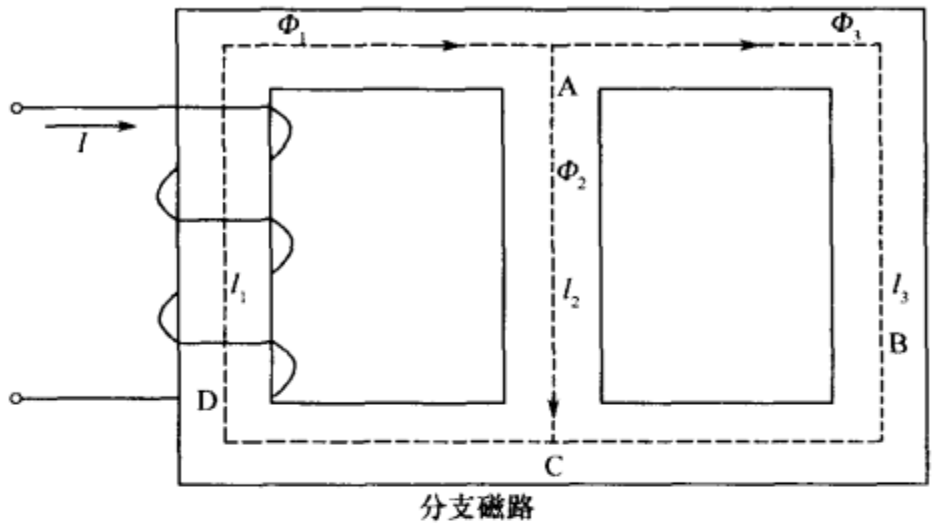
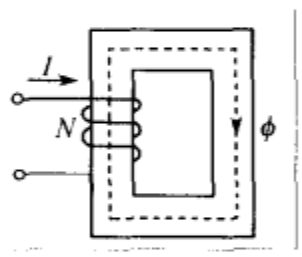
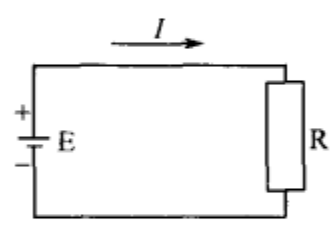


图 5-79　分支磁路

式(5-17)称为磁路基尔霍夫磁通定律；式(5-18)称为磁路基尔霍夫磁压定律。

为便于理解，表 5-4 对磁路和电路的有关物理量进行了比较。

表 5-4　磁路和电路有关物理量比较

磁　路	电　路
	
磁动势 F	电动势 E
磁通量 Φ	电流 I
磁感应强度 B	电流密度 J
磁阻 $R_m=\frac{L}{\mu S}$	电阻 $R=\frac{L}{\rho S}$
欧姆定律 $\Phi=\frac{F}{R_m}$	欧姆定律 $I=\frac{E}{R}$
基尔霍夫磁通定律 $\sum\Phi_k = 0$	基尔霍夫电流定律 $\Sigma I = 0$
基尔霍夫磁压定律 $\Sigma NI = \Sigma(HL)$	基尔霍夫电压定律 $\Sigma E = \Sigma(IR)$

第六章　交流电路

电流除了直流电，还有大小和方向都随时间作周期性变化的电流，叫做交流电。交流发电机中所产生的电动势和音频信号发生器所输出的信号电压，都是随时间按正弦规律变化的，它们是常用的正弦电源。在生产上和日常生活中应用的交流电，一般都是指正弦交流电。因此，正弦交流电路是电路基础中很重要的一部分。本章中所讨论的一些基本概念、基本规律和基本分析方法，是后面学习电子电路的理论基础。由于交流电路具有用直流电路的概念无法理解和无法分析的物理现象，因此，在学习本章的时候，必须建立交流的概念，否则容易引起错误。

第一节　正弦交流电的产生及变化规律

现代工业、农业、交通运输、通信和日常生活中所使用的电能，几乎都取自交流电网。交流电和直流电相比，具有许多突出的优点。首先，交流电能够应用变压器方便地改变电压，使发电、输送、配电和用电既经济又安全。其次，交流发电机和电动机都比直流电机结构简单、成本低廉、坚固耐用、维护简便。此外，需要供给直流电的场合，可以应用整流装置把交流电变换成直流电。可见，分析与研究交流电具有十分重要的意义。

一、直流电和交流电

1. 直流电定义

直流电是指电流方向不变的电流。一种是方向和大小均不变化的电流叫恒定直流电，简称直流电。如常用的干电池、电子设备中经整流滤波后得到的直流电源。另一种是方向不变、大小变化的电流叫脉动直流电和脉冲直流电，如电子技术中的电信号多为此种电流。直流电流波形如图 6-1 所示。

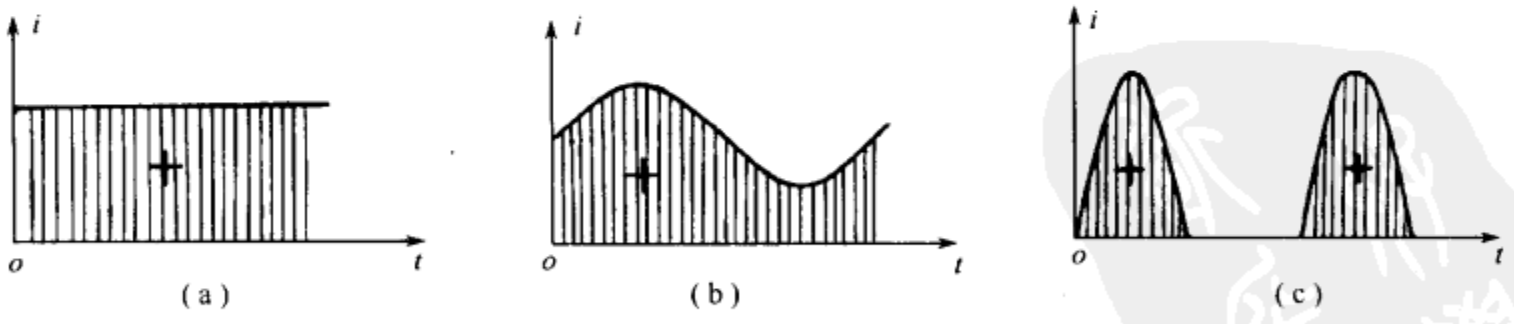


图 6-1　常见直流电波形

(a)恒定直流电；(b)脉冲直流电；(c)脉冲直流电。

2. 交流电流定义

交流电流是指电流方向变化的电流，它也分为两种。一种是纯交流电，其正电流与负电流方向相反，但其平均值为零。另一种是非纯交流电，其方向变化，但其平均值不为零。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

常见交流电流波形如图 6-2 所示。其中正弦交流电是最简单、最常用的交流电流。

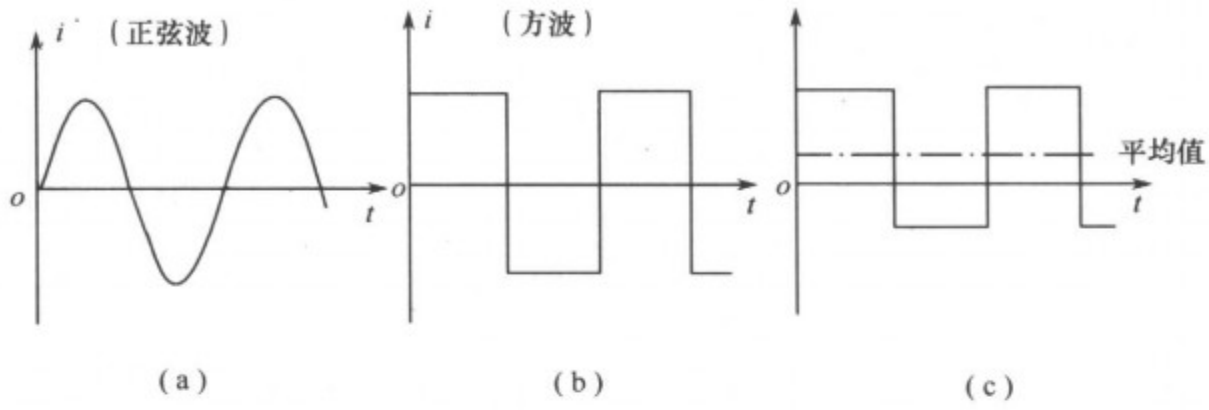


图 6-2　常见交流电流波形

(a)纯交流电；(b)纯交流电；(c)非纯交流电。

二、正弦交流电的产生

正弦交流电是最常用的电流，如我们日常用的照明电源就是用正弦交流电，无线电技术中普遍用正弦交流电。所有非正弦交流电都可以用很多正弦交流电流叠加而成，如电子琴能发出各种乐器的声音，就是利用这个原理组成的；无线电信号也多是利用这个原理合成各种无线电信号电流的。反过来，我们也可理解，一个非正弦交流电是由多个正弦交流电所组成的，这个概念极为重要，否则无法理解无线电技术的很多原理。

正弦交流电的产生可分为两种：一种是由发电机产生的正弦交流电；另一种是无线电技术中常用的晶体三极管和电感电容组成的正弦波振荡器产生的正弦交流电。下面简要分析发电机是如何产生正弦交流电的。

法拉第发现的电磁感应现象的一个重大应用是制成发电机，图 6-3 所示为最简单的交流发电机。当在匀强磁场中转动矩形线圈时，转动速度慢时会发现灯泡一闪一闪地发光(快转时则不易看出闪亮)，表明电路里产生了交流电。其实，我们日常生活中的电灯也是一闪一闪的，只不过每秒闪 50 次，人们看不出闪动而已。如果将发电机模型中的灯泡取下，连接上电流表，再慢慢旋转矩形线圈，可以看出，电流表指针忽大忽小、忽左忽右地摆动，这更形象地表明了电路里产生了交流电。



图 6-3　最简单的交流发电机

(a)电流流动：当线圈在两个磁极间转动时，在转动的前半圈电流沿着电线流动；

(b)电流消失：当线圈转到一半的位置时，没有电流；(c)电流反向：当线圈转到后半圈时，

又产生电流了。这时，通过灯泡的电流方向改变、电流从相反的方向流回来，这种电流叫做交流电(或 AC)。

阅读材料：交流发电机

图 6-3 其实就是一个交流发电机的模型。实际的发电机，结构比较复杂，但发电机的基本组成部分仍是线圈（通常叫电枢）和磁极。电枢转动、磁极不动的发电机，叫做旋转电枢式发电机；磁极转动，而电枢不动，线圈依然切割磁力线，电枢同样会产生感生电动势，这种发电机叫旋转磁极式发电机。不论哪种发电机，转动的部分都叫转子，不动的部分都叫定子。旋转电枢式发电机，转子产生的电流必须经过裸露着的滑环和电刷引到外电路，如果电压很高，就容易发生火花放电，有可能烧毁电机；同时，电枢可能占有的空间也受到限制，线圈匝数不能很多，产生的感生电动势不能很高，这种发电机提供的电压一般不超过 500V。旋转磁极式发电机克服了上述缺点，能够提供几千到几万伏的电压，输出功率可达几十万千瓦，所以大型发电机都是旋转磁极式的。

发电机的转子是由蒸气轮机、水轮机或其他动力机带动的，动力机将机械能传递给发电机，发电机把机械能转化为电能输送给外电路。

三、正弦交流电的变化规律

现在来研究正弦交流电的变化规律。

如图 6-4 所示，在静止的磁极 N 和 S 间，放一个能转动的线圈 abcd，线圈的两端分别接到两个铜制滑环上，滑环固定在转轴上，并与转轴绝缘。每个滑环上安放着一个静止的电刷，用来把线圈中感应出来的正弦交流电动势和外电路接通。当线圈 abcd 在外力作用下，在磁场中以角速度 ω 匀速转动时，线圈的 ab 边做切割磁力线运动，线圈中产生感生电动势。如果外电路是闭合的，闭合回路中将产生感应电流。ad 和 bc 边的运动不切割磁力线，不产生感应电动势。

设线圈从图(a)所示位置（设此时为 0°位置）开始，ab 边向左运动，cd 边向右运动，线圈平面垂直于磁感线，ab、cd 边此时速度方向与磁感线平行，线圈中没有感应电动势，没有感应电流。

在线圈平面垂直于磁感线绕垂直磁感线轴转动时，各边都不切割磁感线，线圈中没有感应电流，这样的位置叫做中性面。线圈在中性面位置时，磁通量 Φ 最大；磁通量变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 最小；感应电动势和感应电流均为零。

当线圈平面逆时针转过 90°时，如图(b)所示，即线圈平面与磁感线平行时，ab、cd 边的线速度方向都与磁感线垂直，即两边都垂直切割磁感线，这时感应电动势最大，线圈中的感应电流也最大。

当线圈到达 180°位置时，如图(c)所示，此时，线圈又处于中性面位置，线圈中没有感应电动势。

当线圈到达 270°位置时，如图(d)所示，此时，ab、cd 边的瞬时速度方向，与线圈经过 90°位置时的速度方向相反，产生的感应电动势方向也与在 90°位置时相反。

当到达 360°位置时，如图(e)所示，线圈回到起始位置，与 0°位置相同，线圈中没有感应电动势。

如图 6-5 是转动线圈的前视图和截面图，标 a 的小圆圈表示线圈 ab 边的横截面，标 d

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

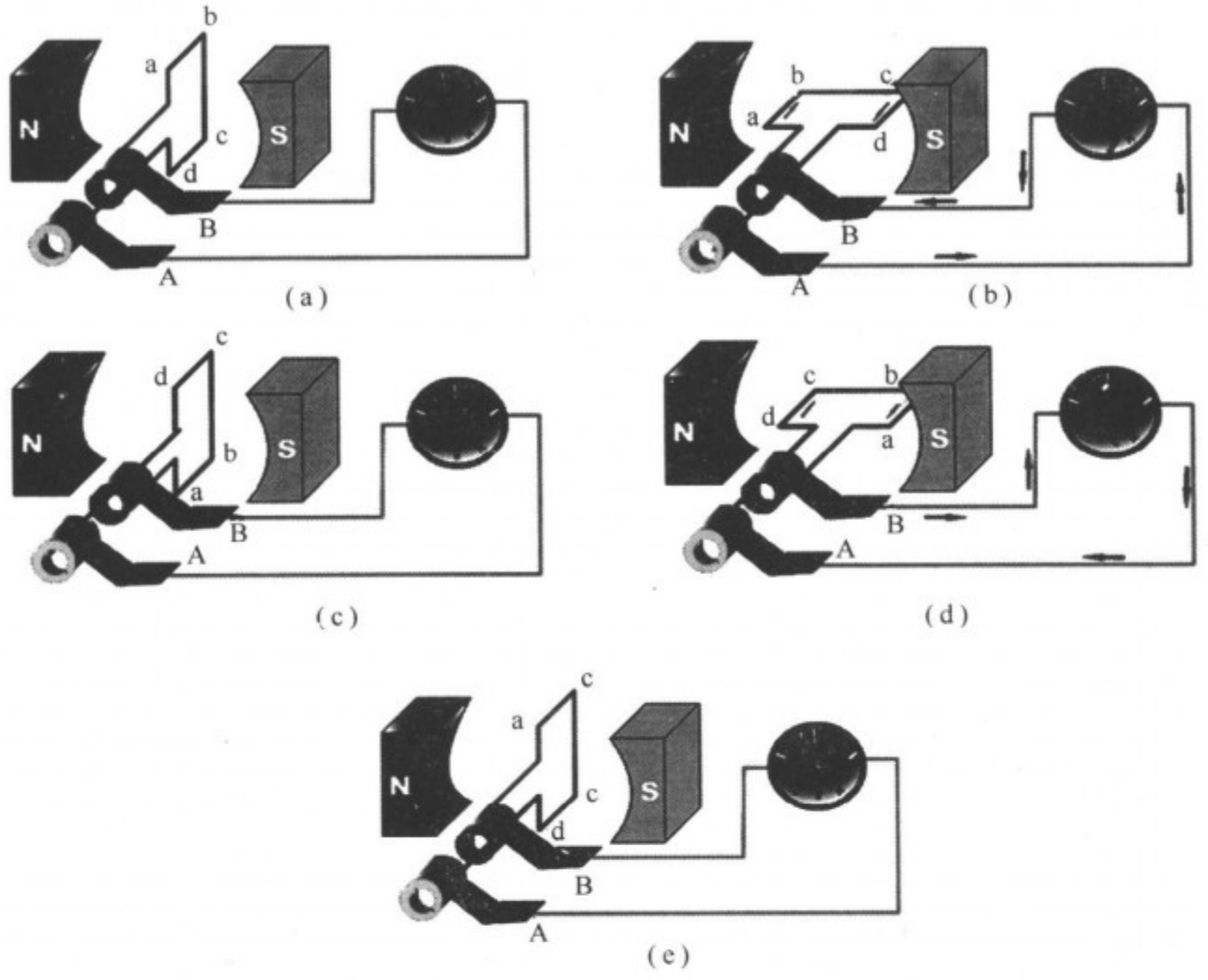


图 6-4　线圈旋转

(a)线圈在 0°位置时；(b)线圈在 90°位置时；(c)线圈在 180°位置时；(d)线圈在 270°位置时；(e)线圈在 360°位置时。

的小圆圈表示线圈 cd 边的横截面。假定线圈平面从中性面开始转动，角速度是 ω(弧度/秒)，经过时间 t，线圈转过的角度是 ωt，ab 边的线速度的方向与磁力线方向间的夹角也等于 ωt，设 ab 边的长度是 L，磁感应强度是 B。ab 边中的感生电动势就是 $e_{ab}=BLv\sin\omega t$，cd 边中的感生电动势与 ab 边中的大小相同，而且两边又是串联的，所以这一瞬间整个线圈中的感生电动势 e 可用下式表示：

$$e=2BLv\sin\omega t$$

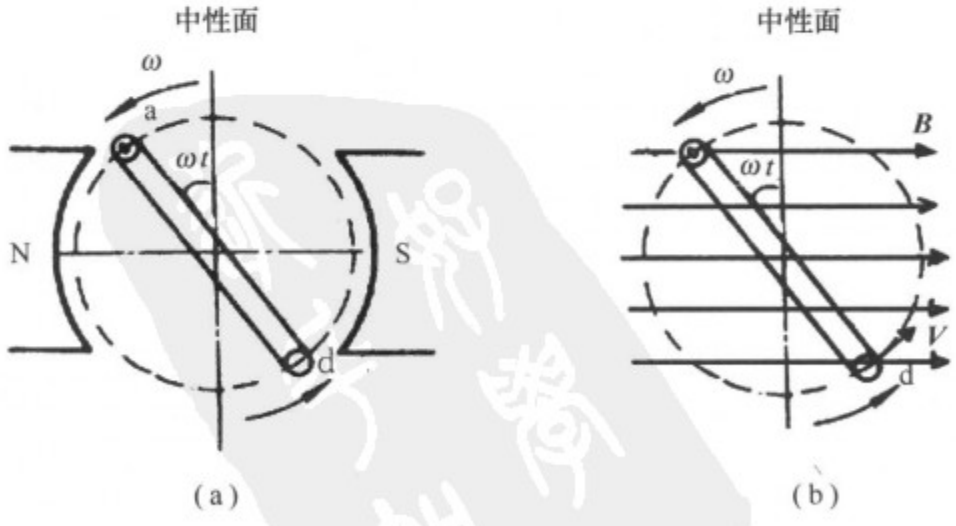


图 6-5　转动线圈的前视图和截面图

(a)前视图；(b)截面图。

当线圈平面转到与磁力线平行的位置时，ab 边和 cd 边的线速度方向都与磁感线垂直，两边都垂直切割磁感线，这时，$\omega t=\frac{\pi}{2}$，$\sin\omega t=1$，感生电动势最大，用 E_m 表示，即 $E_m=2BLv$，把它代入 $e=2BLv\sin\omega t$，就得到

$$e=E_m\sin\omega t \tag{6-1}$$

式中的 e 随着时间而变化，不同时刻有不同的数值，叫做电动势的瞬时值，E_m 叫做电动势的最大值。式(6-1)表明，电动势是按照正弦规律变化的。

这时电路中电流强度也是按照正弦规律变化的。设整个闭合电路的电阻为 R，电流的瞬时值为 $i=\frac{e}{R}=\frac{E_m}{R}\sin\omega t$，其中 $\frac{E_m}{R}$ 是电流的最大值，用 I_m 表示，所以

$$i=I_m\sin\omega t \tag{6-2}$$

外电路中一段导线上的电压同样是按照正弦规律变化的。设这段导线的电阻为 R'，电压的瞬时值 $u=iR'=I_mR'\sin\omega t$，其中 I_mR' 是电压的最大值，用 U_m 表示，所以

$$u=U_m\sin\omega t \tag{6-3}$$

上述各式都是从线圈平面跟中性面重合的时刻开始计时的。如果不是这样，而是如图 6-6 所示，从线圈平面跟中性面有一夹角 ϕ 时开始计时，那么，经过时间 t，线圈平面跟

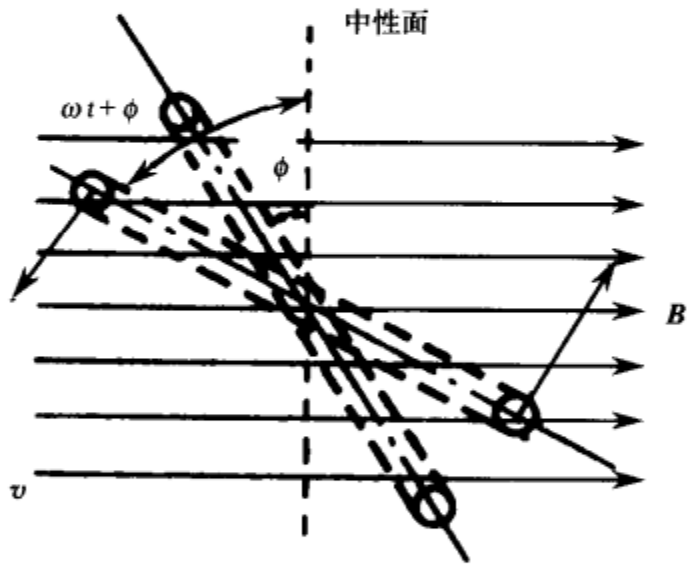


图 6-6　线圈平面跟中性面有一夹角 ϕ 时

中性面间的角度是 $\omega t+\phi$，感生电动势的公式就变成：

$$e=E_m\sin(\omega t+\phi) \tag{6-4}$$

电流和电压的公式分别变成：

$$i=I_m\sin(\omega t+\phi) \tag{6-5}$$

$$u=U_m\sin(\omega t+\phi) \tag{6-6}$$

从以上可以看出，e、i、u 都是按照正弦规律变化的，这种按照正弦规律变化的交流电叫做正弦交流电。正弦交流电是一种最简单而又最基本的交流电。

交流电的变化规律也可以用图直观地表示出来。图 6-7 是交变电动势 $e=E_m\sin\omega t$ 的示意图，图上方画出了对应于交变电动势等于零或正、负最大值时的线圈位置。

图 6-8 是交变电流 $i=I_m\sin(\omega t+\phi)$ 或交变电压 $u=U_m\sin(\omega t+\phi)$ 的示意图。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

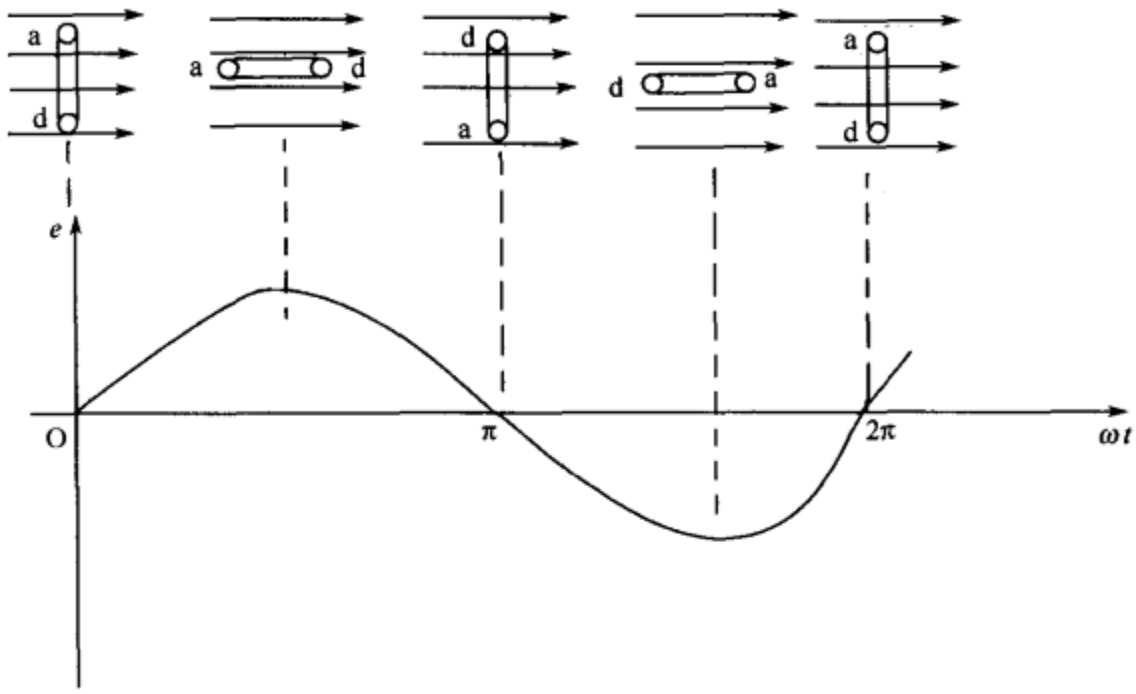


图 6-7　$e=E_m\sin\omega t$ 的示意图

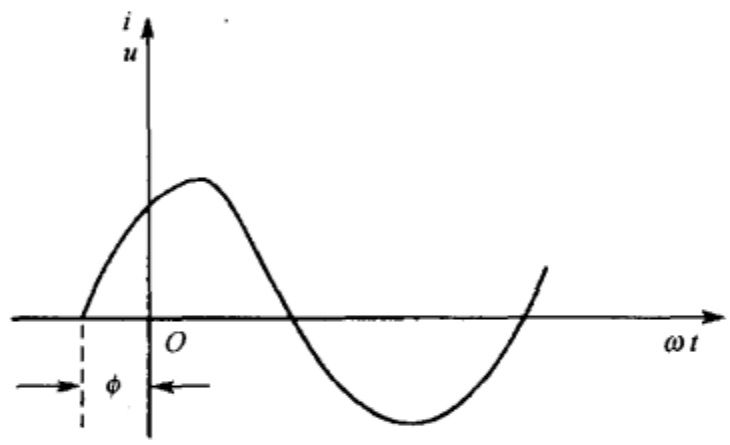


图 6-8　$i=I_m\sin(\omega t+\phi)$或交变电压 $u=U_m\sin(\omega t+\phi)$的示意图

第二节　正弦交流电的三要素

直流电不随时间而变化，要描述电路中的电流或电压，只要指出电流强度或电压的数值就够了；交流电则不然，交流电的电流或电压、大小和方向都随时间做周期性的变化，要描述它们，需要的物理量就要多些。

一、瞬时值、最大值、有效值和平均值

1. 瞬时值

瞬时值对应某一时刻交流电的值，瞬时值一般用小写字母表示，如 e、i、u 分别表示电动势、电流和电压的瞬时值。

2. 最大值

交流电的最大值是交流电在一周期内所能达到的最大数值，可以用来表示交流电的电流强弱或电压高低，在实际中有重要意义。例如，把电容器接在交流电路中，就需要知道交变电压的最大值，电容器所能承受的电压要高于交变电压的最大值，否则电容器可能

被击穿。

最大值也称峰值，一般用大写字母 E、I、U 和下标 m 表示，如 E_m、I_m、U_m 分别表示电动势、电流和电压的最大值。

3. 有效值

在直流电路中，流过电阻的电流要做功，发热发光。电流做的功 $W=Pt$。例如 1kW(千瓦)电炉的电阻为 $R=48.4\Omega$，加上 220V 直流电压，其电功率为 $P=U^2/R=220^2/48.4=1\text{kW}$，加热 1h(小时)所做的功为 $W=1\text{kW}\cdot\text{h}$(千瓦·小时)$=1$ 度电$=3.6\times10^6\text{J}$(焦耳)。

若使用市电 50Hz(赫兹)正弦交流电，同样能使电炉发热。但是交流电流方向在不断变化，而且大小也在零和最大值之间变化。电炉的电阻丝发热只与电流大小有关系，电流大时发热多，电流小时发热少，而与电流方向无关，人们所以没有感觉到电炉忽冷忽热，是因为它有一定的热惯性，对每秒钟方向变化 100 次(50Hz)的速度反应不过来。白炽热灯也同样感觉不到忽明忽暗。为了明确表示交流电做功的度量与直流电做功相一致，定义了交流电的有效值。

交流电的有效值是根据电流热效应来规定的。让交流电和直流电通过相同阻值的电阻，如果它们在相同时间内产生的热量相等，就把这一直流电的数值叫做这一交流电的有效值。例如，某一交变电流通过一段电阻丝，在一段时间内产生的热量为 Q，如果改用 3A 的直流电通过这段电阻丝，在相同的时间内产生的热量也为 Q，那么，这一交变电流的有效值就是 3A。交流电压的有效值可以用同样的方法来确定。通常用 I 和 U 分别表示交变电流和电压的有效值，这样，知道了交流电的有效值，很容易求出交流电通过电阻时产生的热量。设电流的有效值为 I，电阻为 R，在时间 t 内产生的热量 $Q=I^2Rt$。这跟直流电路中焦耳定律的形式完全相同，所不同的是在交流电中电流要用有效值。

进一步的计算表明，正弦交流电的有效值与最大值之间有如下关系：

$$U=\frac{U_m}{\sqrt{2}} \tag{6-7}$$

$$I=\frac{I_m}{\sqrt{2}} \tag{6-8}$$

人们通常说照明电路的电压是 220V，便是指有效值，其峰值(最大值)为 $U_m=\sqrt{2}\times220=311\text{(V)}$。所有交流电压表或交流电流表的刻度或数字显示值均为正弦交流电的有效值。各种使用交流电的电气设备上所标的额定电压和额定电流的数值，一般交流电流表和交流电压表测量的数值，也都是有效值。以后提到交流电的数值，凡没有特别说明的，都是指有效值。测量和计算正弦交流电问题时，一旦采用有效值后，完全可以使用直流电路的欧姆定律、基尔霍夫定律等电学定律。

重点提示：正弦交流电的有效值和峰值之间具有 $U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}$、$I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$ 的关系，非正弦(或余弦)交流电无此关系，但可按有效值的定义进行推导，如对于正负半周最大值相等的方波电流，其热效应和与其最大值相等的恒定电流是相同的，因而其有效值即等于其最大值，即 $I=I_m$。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4. 平均值

由于正弦交流量的波形是对称的，所以，一个周期内交流量的平均值等于零。为此，像图 6-9 那样，对交流电波形从 0 到 π 的正半周期取平均，把取平均的值称为交流量的平均值，用 E_{av}、I_{av}、U_{av}分别表示交流电动势、电流电流、交流电压的平均值。

正弦交流量的平均值和最大值之间有如下关系：

$$E_{av}=\frac{2}{\pi}E_m \tag{6-9}$$

$$I_{av}=\frac{2}{\pi}I_m \tag{6-10}$$

$$U_{av}=\frac{2}{\pi}U_m \tag{6-11}$$

二、周期、频率和角频率

1. 周期和频率

与其他周期性过程一样，交流电也要用周期或频率来表示变化的快慢。在图 6-4 所示的实验里，线圈匀速转动一周，电动势、电流都按正弦规律变化一周，人 们把交流电完成一次周期性变化所需的时间，叫做交流电的周期，通常用 T 表示，单位是秒(s)。除秒之外，还有毫秒(ms)、微秒(μs)和纳秒(ns)，它们的换算关系如下：

$$1s=10^3ms=10^6\mu s=10^9ns$$

交流电在 1s 内完成周期性变化的次数，叫做交流电的频率，通常用 f 表示，单位是赫兹(Hz)，除赫兹之外，还有千赫(kHz)、兆赫(MHz)和吉赫(GHz)，它们的换算关系如下：

$$1Hz=10^{-3}kHz=10^{-6}MHz=10^{-9}GHz$$

根据定义，周期和频率的关系是：

$$T=\frac{1}{f}\text{或}f=\frac{1}{T}$$

我国工农业生产和生活用的交流电，习惯上称为工频和市频，频率是 50Hz，周期是 0.02s，角频率是 314 rad/s，有些国家的工频是 60Hz。除工频外，不同的技术领域还使用其他的频率。

2. 角频率

在公式 $i=I_m\sin(\omega t+\phi)$中，ω 是线圈转动的角速度，表示单位时间内电流角度的变化量，所以

$$\omega=\frac{2\pi}{T}=2\pi f \tag{6-12}$$

人们把 ω 称为角频率，单位是弧度/秒(rad/s)。

角频率(ω)、周期(T)，频率(f)三个量只有一个是独立量，它们都是反映交流电变化快慢的物理量。

三、相位、初相位和相位差

1. 相位和初相位

从交流电瞬时值的表达式可以看出，交流电瞬时值何时为零，何时最大，不是简单地

由时间 t 来确定，而是由 $\omega t+\phi$ 确定的。这个相当于角度的量 $\omega t+\phi$ 对于确定交流电的大小和方向起着重要作用，叫做交流电的相，又叫相位。ϕ 是 $t=0$ 时的相，叫做初相。在交流电中，相位这个物理量可以用来比较交流电的变化步调，决定正弦量的计时起点。其单位是“弧度”(rad)，初相位与计时起点有关，如图 6-10 所示，若起点取在 A 处，电压的初相位 ϕ 为 0°；若起点取在 B 处，电压的初相位 ϕ 为 90°

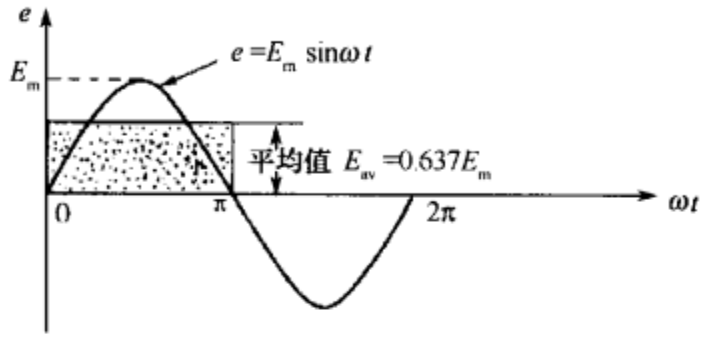


图 6-9　交流量的平均值

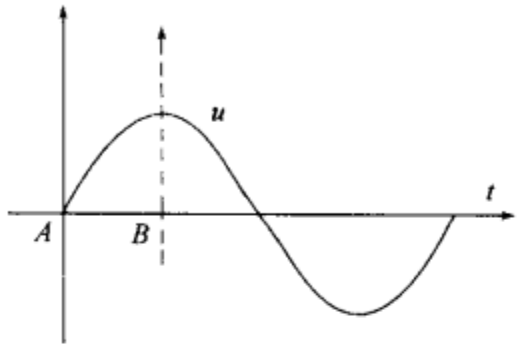


图 6-10　初相位与起点的关系

初相位可以是一个任意数，可正可负，但习惯上常取初相位的绝对值小于 π，如图 6-11所示。

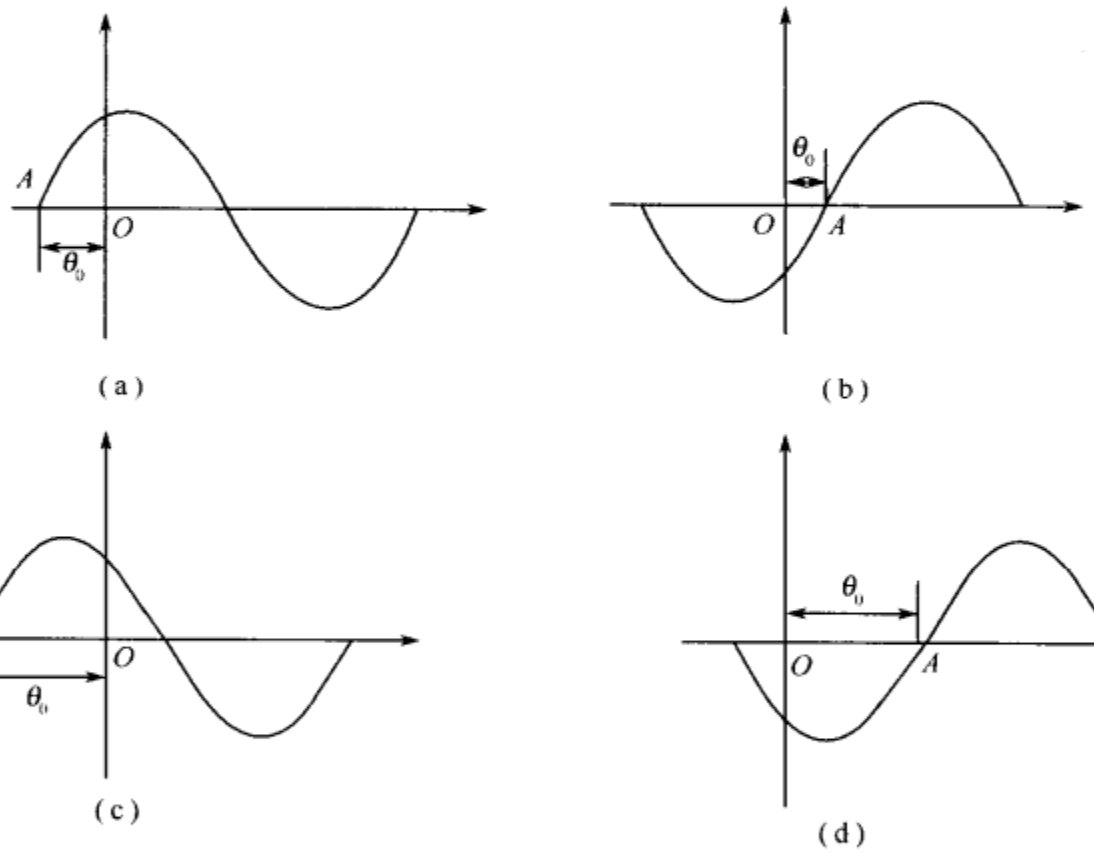


图 6-11　初相位的确定方法

(a)初相位在(0°,90°)之间；(b)初相位在(−90°,0°)之间；
(c)初相位在(0°,180°)之间；(d)初相位在(−180°,0°)之间。

2. 相位差

两个交流电的相位之差叫做它们的相差，又叫相位差，用 $\Delta\phi$ 来表示。如果交流电的频率相同，相差就等于初相位之差，例如，有两个正弦交流电压 e_1 和 e_2，设其相位分别为 $(\omega t+\phi_1)$ 和 $(\omega t+\phi_2)$。

则 e_1 和 e_2 的相位差为：

$$\Delta\phi=(\omega t+\phi_1)-(\omega t+\phi_2)=\phi_1-\phi_2$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

当 $\Delta\phi>0$ 时，e_1 比 e_2 先到达正的最大值、零或负的最大值，这时说 e_1 比 e_2 超前 $\Delta\phi$ 角，或者说 e_1 的初相位大于 e_2 的初相位。

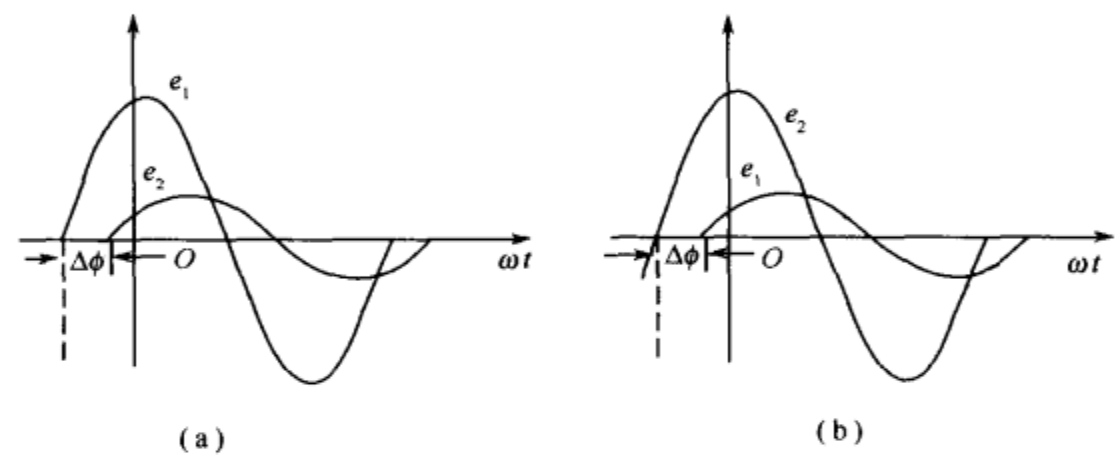
当 $\Delta\phi<0$ 时，说明 e_1 的相位滞后于 e_2 的相位。

当 $\Delta\phi=0$ 时，即 e_1 和 e_2 变化步调一致，同时到达零和正负最大值，这种情况叫做同相位，也称同相。

当 $\Delta\phi=180°(\pi)$ 时，这种情况叫做 e_1 和 e_2 反相，即这两个交流电的变化步调恰好相反；一个到达正的最大值，另一个恰好到达负的最大值；一个减小到零，另一个恰好增大到零。

当 $\Delta\phi=90°(\frac{\pi}{2})$ 时，这种情况叫做 e_1 和 e_2 正交，其特点是当 e_1 达到最大值时，e_2 刚好是零。

以上几种情况如图 6-12 所示。



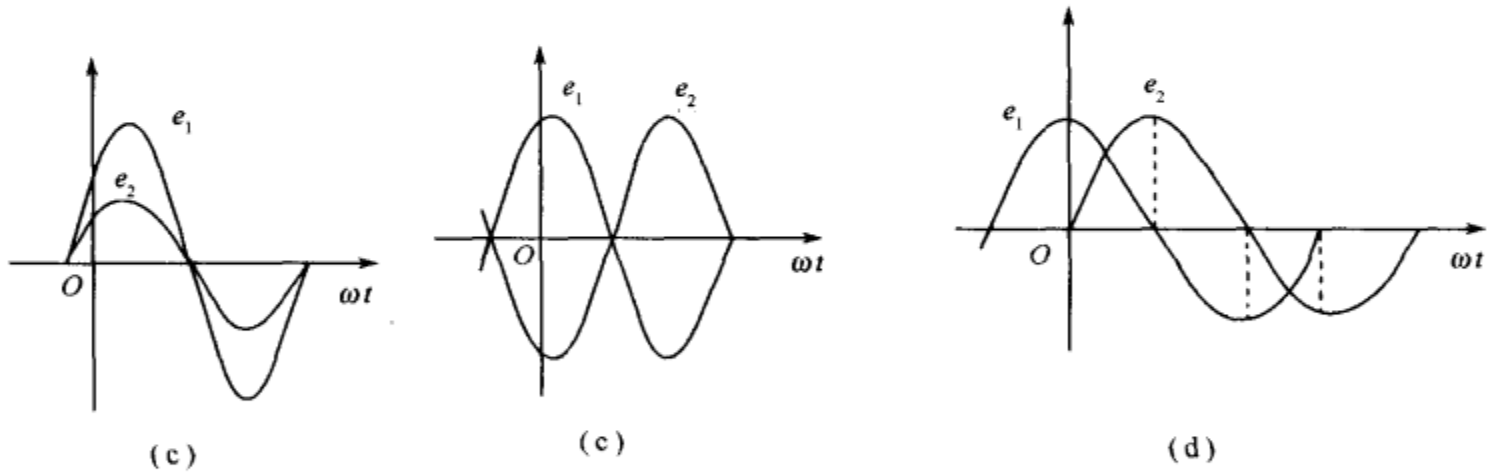


图 6-12　相位差

(a)$\Delta\phi>0$；(b)$\Delta\phi<0$；(c)$\Delta\phi=0$；(d)$\Delta\phi=\pi$；(e)$\Delta\phi=\pi/2$。

四、正弦波形的绘制

如图 6-13 所示为某一正弦电压或电流，要描述该正弦波，只要振幅(峰值)、周期和初相位这三个物理量确定，这个正弦波也就确定了。因此，一般称振幅、周期和初相位为正弦交流电的三要素。分析正弦交流电的问题，实质上就是计算这三个要素的问题。在实际问题中，通常角频率是已知的，因此只要计算幅值和初相位即可。

例 1：画正弦波形时，横轴既可以用时间 t 为横坐标，也可以用 ωt 为横坐标。已知正弦电流 i 的幅值为 5A，频率 $f=50$Hz，初相位 $\phi=-60°$。求：①该电流的周期和角频率；

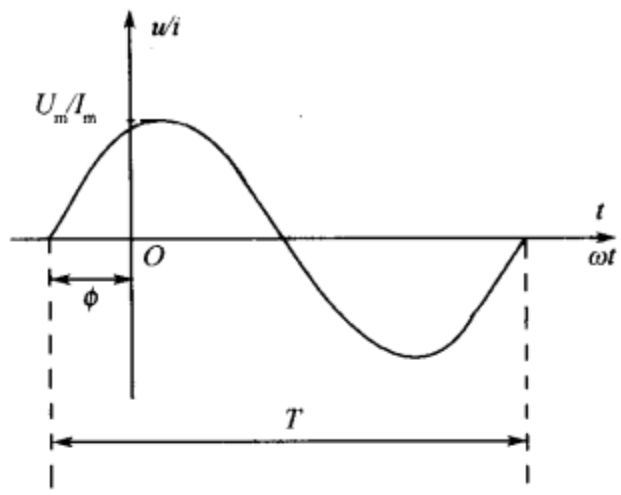


图 6-13　正弦量的三要素

②电流 i 的函数表达式，并画出波形图。

解：①$T=\dfrac{1}{f}=\dfrac{1}{50}=0.02(\mathrm{s})$

$$\omega=2\pi f=2\times 3.14\times 50=314(\mathrm{rad/s})$$

②电流 i 的函数表达式为：

$$i=I_m\sin(\omega t+\phi)=5\sin(314t-60^\circ)$$

根据 i 的函数表达式画出的波形图如图 6-14 所示。

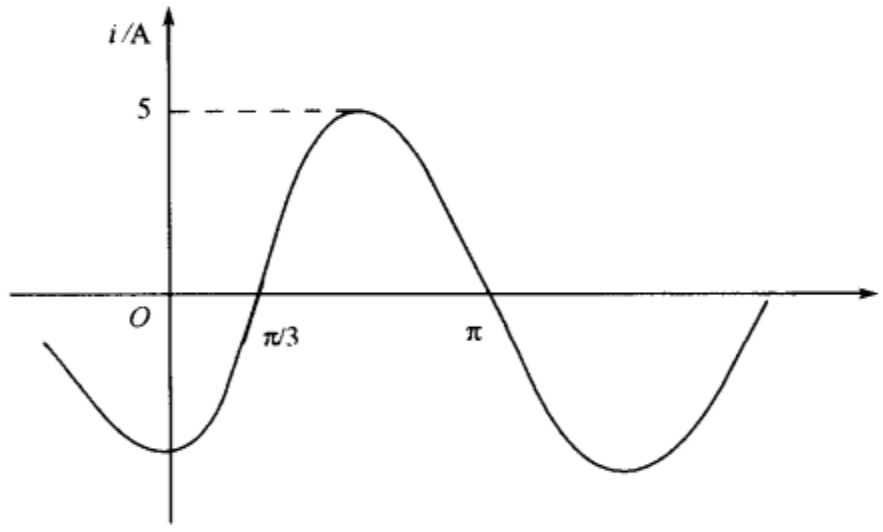


图 6-14　电流 i 的波形图

第三节　正弦交流电的表示法

正弦交流电通常可用函数法（解析式表示法）、图像法和向量图表示法这三种方法进行表示。

一、函数法

函数法是一种利用三角函数式表示交流电特征的方法，如前面介绍的交流电的电动势 $e=E_m\sin(\omega t+\phi)$、电流 $i=I_m\sin(\omega t+\phi)$ 和电压 $u=U_m\sin(\omega t+\phi)$ 的瞬时值表达式就采用了函数法。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

二、图像法

交流电还可能通过与解析式对应的图像来表示，如图 6-15 所示，其最大值、周期、初相位以及任一时刻的瞬时值都可以在图像中表示出来。

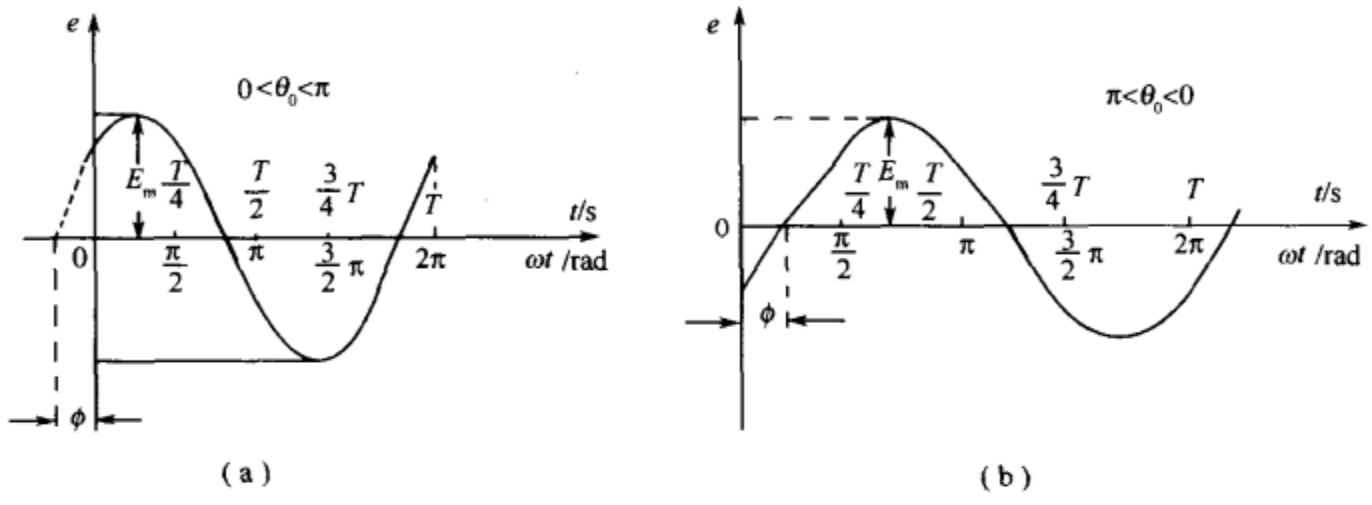


图 6-15　图像法

三、相量图表示法

如图 6-16 所示，从直角坐标原点出发作一有向线段 I_m，它的长度等于正弦量的最大值 I_m，它与横轴的夹角等于正弦量的初相位 ϕ，并以正弦量角频率 ω 逆时针旋转，则在任一瞬间，该有向线段 I_m 在纵轴上的投影就等于该正弦量的瞬时值，即

$$i=I_m\sin(\omega t+\phi)$$

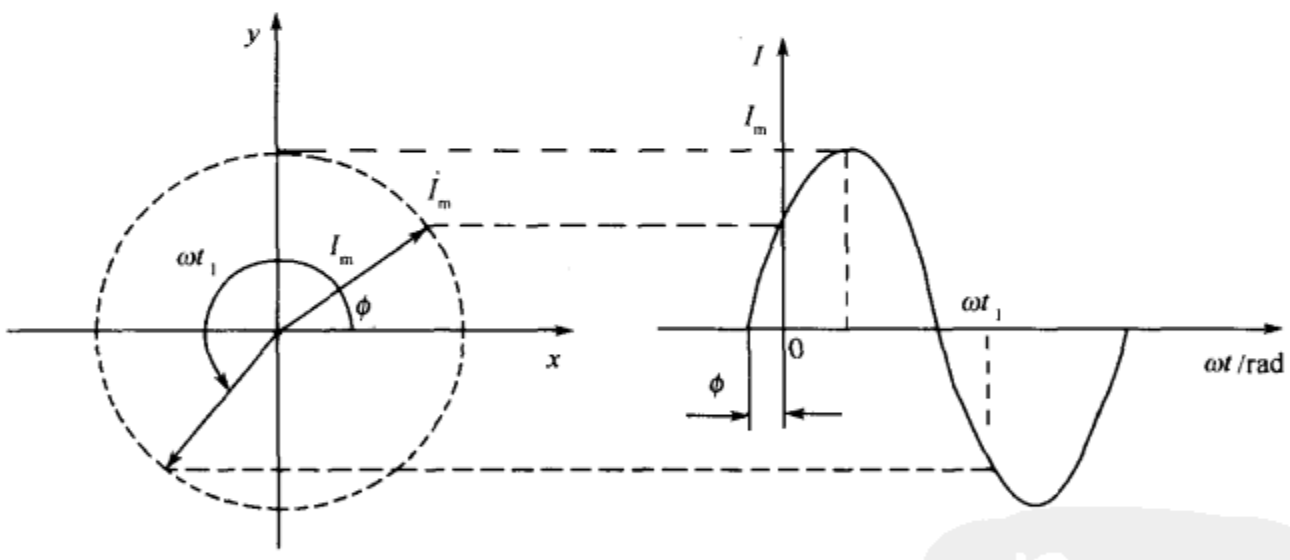


图 6-16　用旋转有向线段表示正弦量

由于正弦量的三要素在旋转的有向线段中均有一一对应关系，因此正弦交流电可以用旋转的有向线段来表示。但是，在同频率正弦量的电路分析中，正弦量的表示只需大小和相位两个要素，因此有向线段 I_m 即可代表正弦电流 $i=I_m\sin(\omega t+\phi)$。例如，在 $t=0$ 时，$i_0=I_m\sin\phi$，在 $t=t_1$ 时，$i_1=I_m\sin(\omega t_1+\phi)$。

按图 6-16 画旋转有向线段表示正弦量是烦琐的，通常只用初始位置($t=0$)的有向线段 $\dot{I}_m$ 表示一正弦量，它的长度等于正弦量的幅值，它与横轴正方向的夹角等于正弦量的初相位，如图 6-17(a)所示。

但是，应该具有这样的概念：这个有向线段是以角频率做逆时针方向旋转的，它在纵轴上的投影表示正弦量的瞬时值。在实际问题中，所涉及的往往是正弦量的有效值，因此，为了方便起见，常使有向线段的长度等于正弦量的有效值，如图 6-17(b)所示的$\dot{I}$。显然，它在纵轴上的投影就不能代表正弦量的瞬时值了。

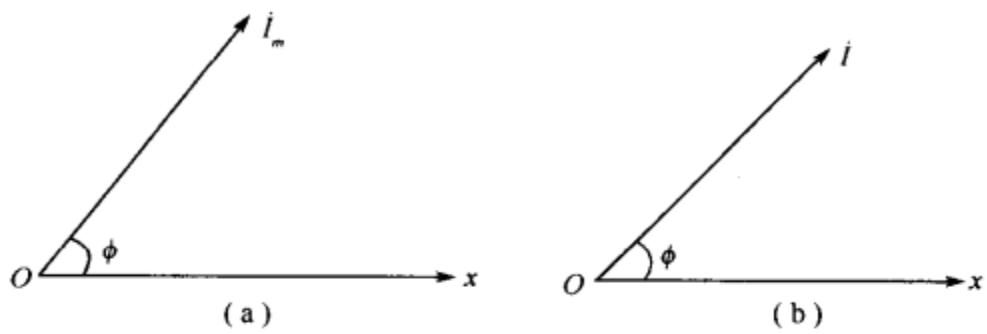


图 6-17　正弦量的向量图表示法

我们把用具有大小和方向的有向线段来表示正弦量的方法，称为正弦量的向量图表示法。具有大小和方向特性的有向线段称为向量，用大写字母加黑点符号“·”来表示。

采用向量图来表示正弦量的幅值和初相时，一般以横轴 OX 的正方向为参考，向量与 OX 正方向的夹角表示初相，自横轴 OX 的正方向起，逆时针旋转相位角度为正，顺时针旋转相位角度为负。向量的长度表示正弦量的有效值(或最大值)。

在向量图上能够清楚地看出各个正弦量在大小和相位上的关系。例如，图 6-18(a)为正弦交流电压 u 和电流 i 的波形图，根据波形图的正弦量的大小和相向画出向量图如图 6-18(b)所示。从向量图中可以看出 u 超前 i 的相位为 $\Delta\phi$。可见，用向量图分析交流电路各电量的关系，既概念清晰，又简明实用。

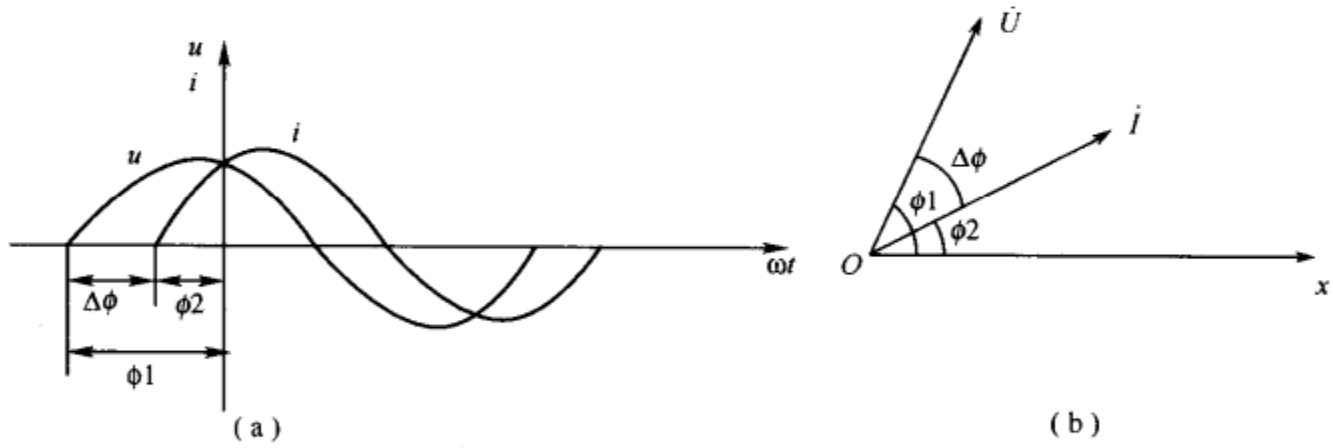


图 6-18　向量图

需要说明的是，只有正弦周期量才能用向量图表示，向量图不能表示非正弦周期量；只有同频率正弦量才能画在同一向量图上，不同频率的正弦量不能画在同一向量图上。

方法技巧：向量和差计算

用向量图来表示两个同频率的正弦量之和或差，遵循平行四边形法则或三角形法则。

求向量和时，可按平行四边形法则进行求解，用代表两个向量的线段作邻边，做一个平行四边形，它的对角线就代表了向量和的大小和方向。

对于图 6-19(a)所示的两个向量$\dot{I}_2$ 和$\dot{I}_1$，设其相位差为 $\Delta\phi$。

根据余弦定理，可求出向量和$\dot{I}$的大小为：

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$I=\sqrt{I_1^2+I_2^2+2I_1I_2\cos\Delta\phi}$$

设$\dot{I}$与$\dot{I}_1$的夹角为θ，根据正弦定理$\frac{I_2}{\sin\theta}=\frac{I}{\sin\Delta\phi}$，可求出$\theta$。

若求两个向量$\dot{I}$和$\dot{I}_1$之差，一般采用三角形法则，如图6-19(b)所示。

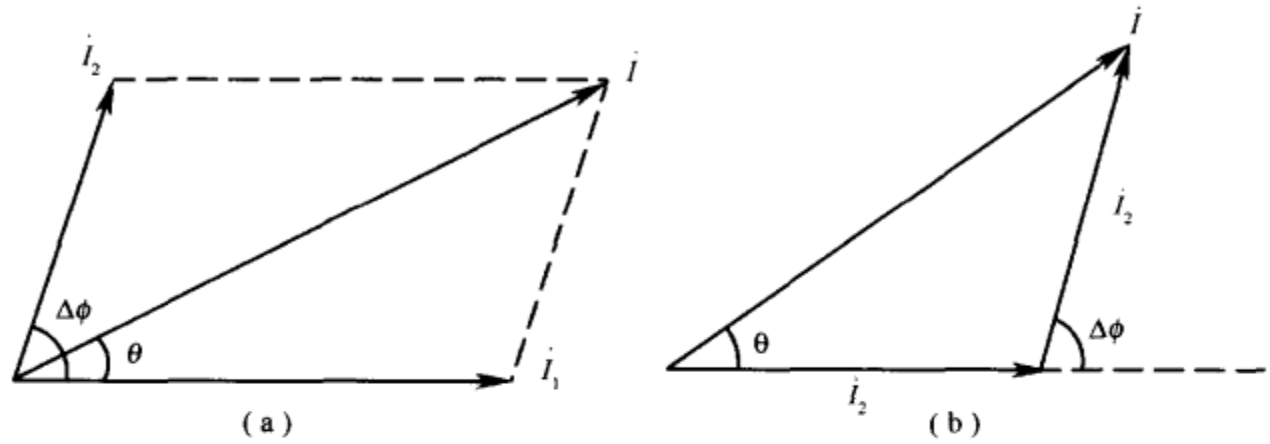


图6-19　向量和差的求解

例2：已知$i_1=8\sin(314t+\frac{\pi}{3})$，$i_2=6\sin(314t-\frac{\pi}{6})$，用向量图相加法求$i_1+i_2$。

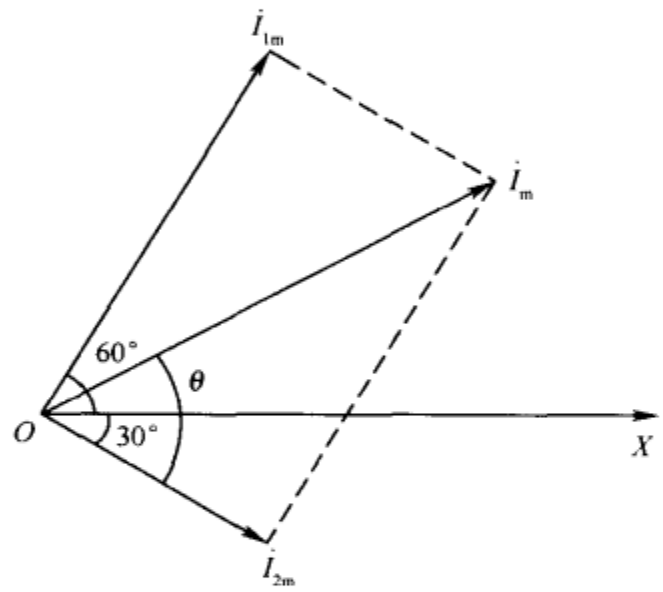


图6-20　例2图

解：先画出电流的向量图，在与OX轴逆时针方向为$\frac{\pi}{3}$处作向量$\dot{I}_{1m}$，长度为8A，在与OX轴顺时针方向夹角为$\frac{\pi}{6}$处作向量$\dot{I}_{2m}$，长度为6A，如图6-20所示。

从向量图可知，这两个向量的相位差为

$$\frac{\pi}{3}-(-\frac{\pi}{6})=\frac{\pi}{2}=90°$$

以这两个向量为两边，作平行四边形，连接从原点出发的对角线，即为两向量之和，也就是总电流的向量。因此，总电流幅度为：

$$I_m=\sqrt{I_{1m}^2+I_{2m}^2+2I_{1m}I_{2m}\cos90°}=\sqrt{8^2+6^2}=10(A)$$

设$\dot{I}_m$与$\dot{I}_{2m}$的夹角为θ，根据正弦定理$\frac{I_{1m}}{\sin\theta}=\frac{I_m}{\sin90°}$，可得

$\frac{8}{\sin\theta}=\frac{10}{1}$，因此

$$\theta=53.1°$$

总电流i的初相位为：

$$\phi=53.1°-30°=23.1°$$

所以，总电流的瞬时值为：$i=10\sin(314t+23.1°)$

第四节　电阻、电感和电容交流电路

一、纯电阻电路

1. 纯电阻电路中电压与电流的关系

交流电路中如果只有电阻，这种电路就叫做纯电阻电路，如图 6-21 所示。白炽电灯、电炉、电烙铁等的电路，就是纯电阻电路。

在纯电阻电路中，在任一时刻电流与电压的关系都服从欧姆定律。设电阻为 R，加在它上面的交变电压是 $u=U_m\sin\omega t$，通过这个电阻的电流的瞬时值为：

$$i=\frac{u}{R}=\frac{U_m}{R}\sin\omega t=I_m\sin\omega t$$

式中，$I_m=\frac{U_m}{R}$，如果都换用有效值，应得到

$$I=\frac{U}{R} \tag{6-13}$$

这就是纯电阻电路中欧姆定律的表达式，这个表达式与直流电路中欧姆定律的形式完全相同，所不同的是在交流电路中电压和电流要用有效值。

2. 纯电阻电路中电压与电流的相位关系

在纯电阻电路中，电流和电压是同相的，即电阻对电流和电压的相位关系没有影响。

3. 电阻元件的功率消耗

(1)瞬时功率

在纯电阻交流电路中，当电流 i 流过电阻 R 时，电阻上要产生热量，把电能转化为热能，电阻上必然有功率消耗。由于流过电阻的电流和电阻两端的电压随时间变化，所以电阻 R 上消耗的功率也随时间变化。电阻中某一时刻消耗的电功率叫做瞬时功率，它等于电压 u 与电流 i 瞬时值的乘积，用小写字母 p 表示，即

$$p=p_{R=}ui=I_mU_m\sin^2\omega t$$

根据最大值和有效值的关系，可得：

$$p=UI(1-\cos2\omega t) \tag{6-14}$$

式(6-1)表明：在任何瞬时，恒有 $p\geqslant0$，说明电阻吸收功率，它是一种耗能元件。图 6-22表示了瞬时功率随 u、i 变化的规律。

(2)平均功率

瞬时功率虽然表明了电阻中消耗功率的瞬时状态，但不便于表示和比较大小，所以，工程中常用瞬时功率在一个周期内的平均值表示功率，称为平均功率，用大写字母 P 表示。平时所说的功率大多数是指平均功率，简称为功率。经计算可知，平均功率 P 为：

$$P=UI=I^2R=\frac{U^2}{R} \tag{6-15}$$

我们看到，在纯电阻电路中，平均功率的表达式与直流电路中的形式完全相同，所不同的是在交流电路中电流和电压要用有效值。

需要注意的是：式(6-13)、式(6-14)和式(6-15)只适用于纯电阻电路，不适用于其他

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

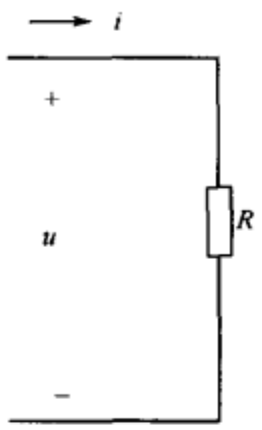


图 6-21　纯电阻电路

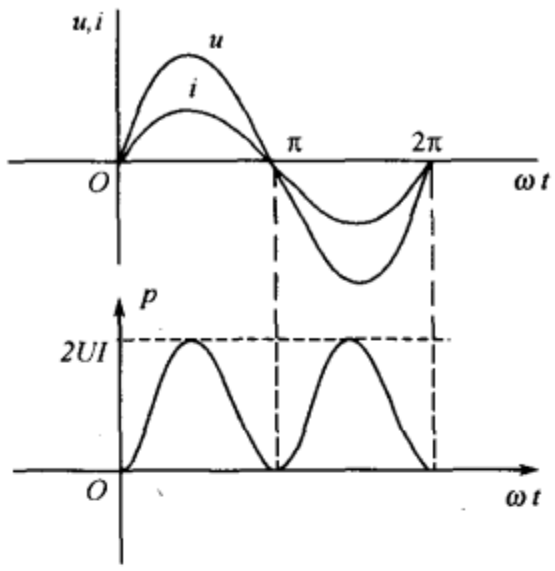


图 6-22　瞬时功率的变化规律

交流电路。在其他交流电路中有类似的公式，下面就会学到。

例 3： 有一个额定值为 220V、1000W 的电阻炉，接在 220V 的交流电源上，求通过电阻炉的电流和它的电阻。如果连续使用 1h，所消耗的电能是多少？

解： $I=\dfrac{P}{U}=\dfrac{1000}{220}=4.55(\mathrm{A})$

$$R=\frac{U^2}{P}=\frac{220^2}{1000}=48.4(\Omega)$$

$$W=Pt=1000\mathrm{W}\cdot\mathrm{h}=1\mathrm{kW}\cdot\mathrm{h}=1\text{ 度}$$

二、纯电感电路

在直流电路中，影响电流和电压关系的只有电阻；在交流电路中，情况要复杂一些，影响电流和电压关系的，除了电阻外，还有电感和电容。

在电工技术中，变压器、电磁铁等的线圈，一般是用铜线绕的。铜的电阻率很小，在很多情况下，线圈的电阻比较小，可以略去不计，而认为线圈只有电感。只有电感的电路叫纯电感电路，如图 6-23 所示。

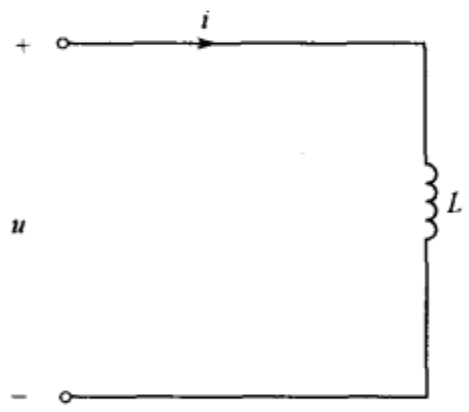


图 6-23　纯电感电路

1. 电感对交流电的阻碍作用

如图 6-24 所示，把电感线圈 L 和白炽灯泡串接在电路里，利用双刀双掷开关 K 可以分别把这个电路接到直流电源或交流电源上。实验中取直流电压和交变电压的有效值相等，实验表明，接通直流电源时，灯泡亮些；接通交流电源时，灯泡变暗，这表明电感对交流电有阻碍作用。

为什么电感对交流电有阻碍作用呢？这是因为交流电通过电感线圈时，电流时刻在改变，电感线圈中必然产生自感电动势，阻碍电流的变化，这样就形成了对电流的阻碍作用。

我们知道，电感对交流电阻碍作用的大小叫做感抗，感抗与电感 L 和频率 f 成正比，

其表达式为：

$$X_L=2\pi fL$$

现在用图 6-25 所示的电路来研究纯电感电路中电流与电压的关系。电路中的 L 是电阻可以略去不计的电感线圈，改变交流电源的电压，通过 L 的电流就随着改变。记下几组相应的电流和电压的数值，就会发现，在纯电感电路中，电流强度与电压成正比，即 $I\propto U$。用 $\frac{1}{X_L}$ 作为比例恒量，写成等式，就得到：

$$I=\frac{U}{X_L} \tag{6-16}$$

这就是纯电感电路中欧姆定律的表达式。把这个表达式与 $I=\frac{U}{R}$ 相比，可以看出 X_L 相当于电阻 R，X_L 表示出电感对交流电阻碍作用的大小。

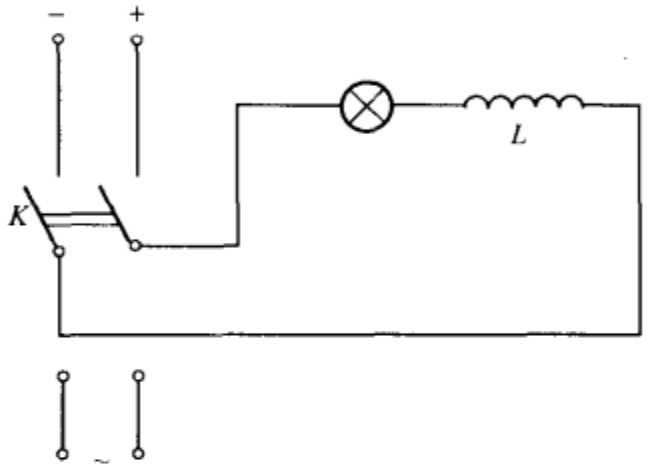


图 6-24　电感对交流电的阻碍作用

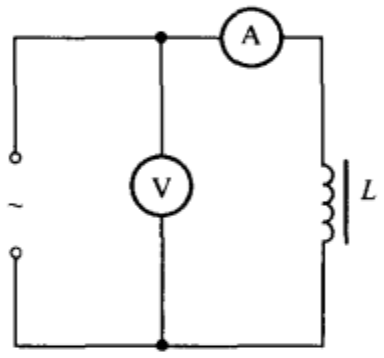
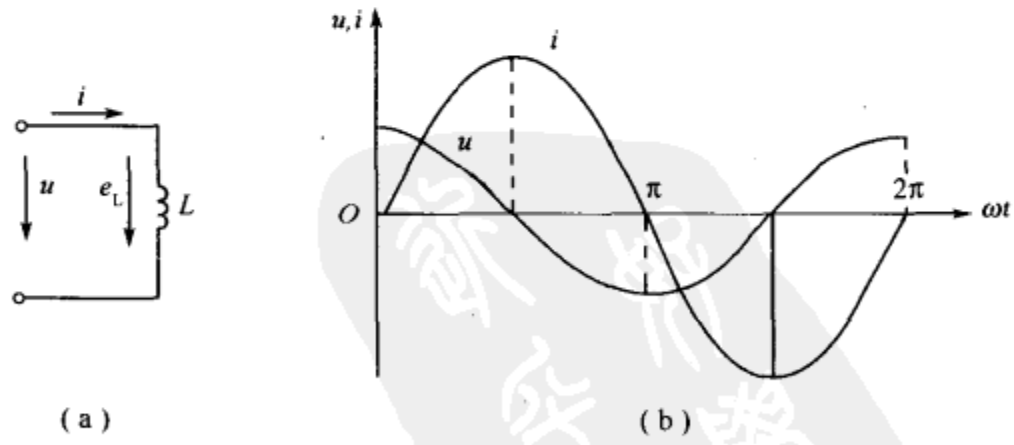


图 6-25　纯电感电路中电流与电压的关系

2. 纯电感电路中电压与电流的相位关系

在纯电感线圈两端，加上交流电压 u，线圈中必定要通过一交流电流。由于电流时刻在变化，因而，线圈中就会产生自感电动势来阻碍电流的变化。因此，线圈中电流的变化要滞后于线圈两端外加电压的变化。

当线圈中通过交流电流 i 时，其中产生自感电动势为 e_L，设电流 i、自感电动势 e_L 和电压 u 的正方向如图 6-26(a)所示。



(a)　　(b)

图 6-26　电感元件上的交流电路

根据基尔霍夫电压定律得：

$$u=-e_L$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

设电流 $i=I_m\sin\omega t$，经过推算，可得电压 u 的瞬时表达式为：

$$u=I_m\omega L\sin(\omega t+90°)=U_m\sin(\omega t+90°)$$

式中，$U_m=I_m\omega L$，即 $U_m=I_mX_L$

可见，纯电感电路中，在相位上，电流比电压滞后 90°，表示电压 u 与电流 i 的正弦波形如图 6-26(b)所示。

在这里，或许有人会问，既然电压 u 与自感电动势 e_L 大小相等而相位相反，即 $u=-e_L$，那么为什么还会有电流呢？首先我们应该注意，自感电动势本身是由于电流的变化而产生的，如果没有电流，当然也就不会产生自感电动势。所谓 u 与 e_L 大小相等、相位相反，这只是说明由于自感电动势具有阻碍电流变化的性质，电源电压必须去平衡它。

重点提示：感抗只是电压与电流的幅值或有效值之比，而不是它们的瞬时值之比，即 $X_L\neq\frac{u}{i}$，因为电感电路与电阻电路不一样，在纯电感电路中，电压与电流之间不成比例关系，例如，如设电压 $u=U_m\sin\omega t$，则电流为 $i=\frac{U_m}{X_L}\sin(\omega t-90°)=I_m\sin(\omega t-90°)$。

阅读材料：扼流圈

我们知道，电阻是由导体本身的电阻率、长度和横截面积决定的，与通过的电流无关，$X_L=2\pi fL$ 告诉我们，感抗却跟通过的电流的频率有关。例如，自感系数是 1H(亨)的线圈，对于直流电，$f=0$，$X_L=0$；对于 50Hz 的交流电，$X_L=314\Omega$；对于 500kHz 的交流电，$X_L=3.14M\Omega$。所以电感线圈在电路中有“通直流、阻交流”或“通低频、阻高频”的特性。在电工和电子技术中，用来“通直流、阻交流”的电感线圈，叫**低频扼流圈**。线圈绕在闭合的铁心上，匝数为几千甚至超过一万，自感系数为几十亨，这种线圈对低频交流电就有很大的阻碍作用。用来“通低频、阻高频”的电感线圈，叫**高频扼流圈**。线圈有的绕在圆柱形的铁氧体心上，有的是空心的，匝数为几百，自感系数为几个毫亨，这种线圈对低频交流电的阻碍作用较小，对高频交流电的阻碍作用很大。

3. 纯电感电路功率消耗

(1)瞬时功率

设电流 $i=I_m\sin\omega t$，$u=U_m\sin(\omega t+90°)$，则瞬时功率为：

$$p=p_L=ui=U_mI_m\sin\omega t\sin(\omega t+90°)=U_mI_m\sin\omega t\cos\omega t$$

$$=\frac{U_mI_m}{2}\sin2\omega t$$

即

$$p=UI\sin2\omega t \tag{6-17}$$

由式 6-17 可见，瞬时功率 p 是一个幅值为 UI、并以 2ω 的角频率随时间而变化的交变量，其变化波形如图 6-27 所示。

在第一个和第三个 1/4 周期内，p 是正的(u 和 i 正负相同)，在第二个和第四个 1/4 周期内，p 是负的(u 和 i 一正一负)。瞬时功率的正负可以这样来理解：当瞬时功率为正值时，外电路处于用电状态，它从电源取用电能；当瞬时功率为负值时，外电路处于发电状态，它把电能归还电源。电感元件的交流电路中，在第一个和第三个 1/4 周期内，电流值在增大，即磁场在建立，电感线圈从电源取用电能，并转换为磁能而储存在线圈的磁场内；

在第二个和第四个 1/4 周期内，电流值在减小，即磁场在消失，线圈放出原先储存的能量并转换为电能而归还给电源。这是一种可逆的能量转换过程。在这里，线圈从电源取用的能量一定等于它归还给电源的能量。因为已假定电路中的电阻很小，可以忽略不计，也就是说电路中没有消耗能量。

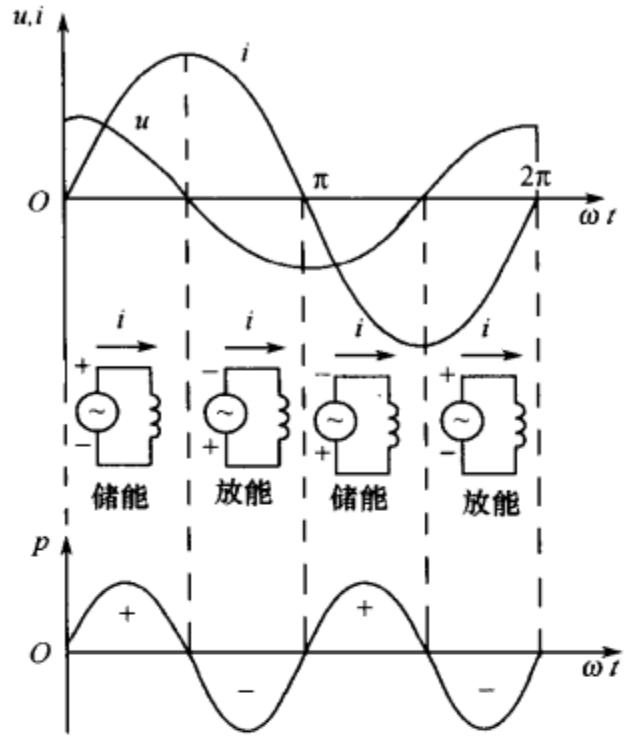


图 6-27　瞬时功率变化波形

(2)无功功率和有功功率

在纯电感电路中，平均功率 $P=0$，关于这一点，从瞬时功率的波形中也容易看出。

由上述可知，在电感元件的交流电路中，没有能量消耗，只有电源与电感元件间的能量互换。这种能量互换的规模，用无功功率 Q_L 来衡量，且规定：无功功率等于瞬时功率 p 的幅值，即

$$Q_L=UI=I^2X_L \qquad (6\text{-}18)$$

无功功率的单位是乏(var)或千乏(kvar)。

应当指出，电感元件和后面将要讲的电容元件都是储能元件，它们与电源间进行能量互换是工作所需。这对电源来说，也是一种负担，但对储能元件本身说，没有消耗能量，故命名为无功功率。由此，平均功率也可称为有功功率。

例 4：把一个 0.1H 的电感元件接到频率为 50Hz、电压有效值为 10V 的正弦电源上，问电流是多少？如保持电压值不变，而电源频率改变为 5000Hz，这时电流将为多少？

解：当 $f=50\text{Hz}$ 时

$$X_L=2\pi fL=2\times3.14\times50\times0.1=31.4(\Omega)$$

$$I=\frac{U}{X_L}=\frac{10}{3.14}=0.318(\text{A})=318\text{mA}$$

当 $f=5000\text{Hz}$ 时

$$X_L=2\pi fL=2\times3.14\times5000\times0.1=3140(\Omega)$$

$$I=\frac{U}{X_L}=\frac{10}{3140}=0.00318(\text{A})=3.18\text{mA}$$

可见，在电压值一定时，频率愈高，则通过电感元件上的电流愈小。

例 5：一个线圈的电感 $L=350\text{mH}$，其电阻可忽略不计，接至频率 50Hz、电压为 220V 的交流电源上。求电流与无功功率 Q_L 是多少？若保持电源电压不变，电源频率为 5000Hz 时，线圈中的电流与无功功率又是多少？

解：当 $f=50\text{Hz}$ 时

$$X_L=2\pi fL=2\times3.14\times50\times0.35=110(\Omega)$$

$$I=\frac{Y}{X_L}=\frac{220}{110}=2(\text{A})$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$Q_L = I^2 X_L = 2^2 \times 110 = 440(\text{var})$$

当 $f=5000\text{Hz}$ 时

$$X_L = 2\pi f L = 2 \times 3.14 \times 5000 \times 0.35 = 11000(\Omega)$$

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{220}{11000} = 0.02(\text{A})$$

$$Q_L = I^2 X_L = 0.02^2 \times 11000 = 4.4(\text{var})$$

三、纯电容电路

只接有电容器的电路，连接导线的电阻一般都很小，可以略去不计，而认为电路中只有电容，只有电容的电路叫纯电容电路。

1. 交流电能够通过电容器

如图 6-28 所示，把白炽灯泡和电容器串联在电路里，如果接通直流电源，灯泡不亮，说明直流电不能通过电容器；如果接通交流电源，灯泡亮了，说明交流电能够“通过”电容器。由此可知，交流电表现出与直流电不同的特性。

直流电不能通过电容器是容易理解的，交流电为什么能够“通过”电容器呢？原来，电流实际上并没有通过电容器的电介质，只不过在交变电压的作用下，当电源电压升高时，电容器充电，电荷向电容器的极板上集聚，形成充电电流；当电源电压降低时，电容器放电，电荷从电容器的极板上放出，形成放电电流。电容器交替进行充电和放电，电路中就有了电流，似乎交流电通过了电容器。

2. 电容对交流电的阻碍作用

在图 6-28 的实验中，如果把电容器从电路中取下来，使灯泡直接与交流电源相接，可以看到，灯泡要比接有电容器时亮得多，这表明电容也对交流电有阻碍作用。

为什么电容对交流电有阻碍作用呢？原来，对导线中形成电流的自由电荷来说，当电源的电压推动它们向某一方向做定向运动时，电容器两极板上积累的电荷会反抗它们向这个方向做定向运动，这就产生了电容对交流电的阻碍作用。

我们知道，电容对交流电阻碍作用的大小叫做容抗，容抗的大小 X_C 与频率 f 和电容器电容 C 成反比，其表达式为：

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \tag{6-19}$$

现在用图 6-29 所示的电路来研究纯电容电路中电流与电压的关系。改变电路两端的电压，电路中的电流就随着改变，记下几组相应的电流和电压的数值，就会发现，在纯电容电路中，电流强度与电压成正比，即 $I \propto U$。用 $\frac{1}{X_C}$ 作为比例恒量，写成等式，就得到

$$I = \frac{U}{X_C} \tag{6-20}$$

这就是纯电容电路中欧姆定律的表达式。把这个表达式与 $I=\frac{U}{R}$ 相比，可以看出 X_C 相当于电阻 R，X_C 表示出电容对交流电阻碍作用的大小。

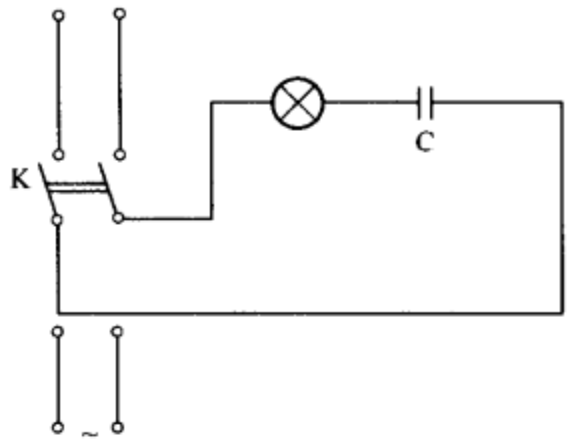


图 6-28　交流电能够通过电容器

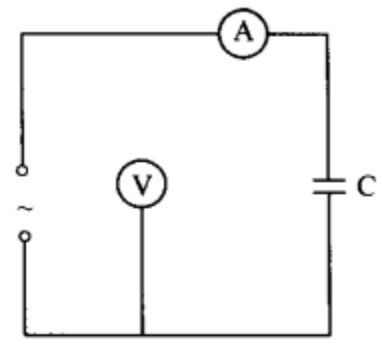


图 6-29　纯电容电路中电流与电压的关系

阅读材料：隔直电容器和旁路电容器

从前面分析中知道，容抗与通过的电流的频率有关，即容抗与频率成反比，频率越高，容抗越小。例如，10μF 的电容器，对于直流电，$f=0$，X_C 为 ∞；对于 50Hz 的交流电，$X_C=318\Omega$；对于 500kHz 的交流电，$X_C=0.0318\Omega$，所以电容器在电路中有“通交流、隔直流”或“通高频、阻低频”的特性。这种特性，使电容器成为电子技术中的一种重要元件。

在电子技术中，从某一装置输出的电流常常既有交流成分，又有直流成分。如果只需要把交流成分输送到下一级装置，只要在两级电路之间串联一个电容器，如图 6-30(a)所示，就可以使交流成分通过，而阻止直流成分通过，用于这种用途的电容器叫做隔直电容器，隔直电容器的电容一般较大。如果只需要把低频成分输送到下一级装置，只要在下一级电路的输入端并联一个电容器，如图 6-30(b)所示，就可以达到目的。电容器对高频成分的容抗小，对低频成分的容抗大，高频成分就通过电容器，而使低频成分输入到下一级，用于这种用途的电容器叫做高频旁路电容器，高频旁路电容器的电容一般较小。

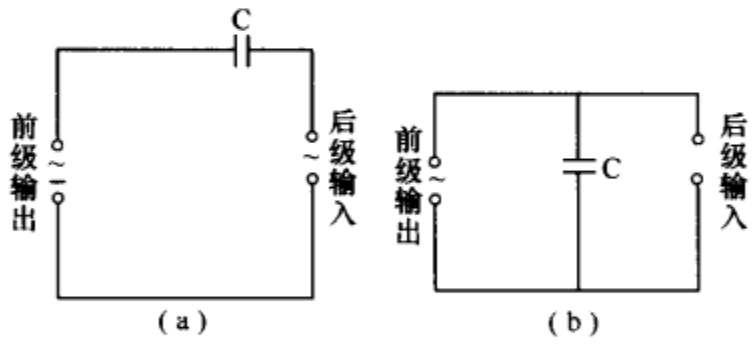


图 6-30　隔直电容器和高频旁路电容器

(a)隔直电容器；(b)高频旁路电容器。

3. 纯电容电路中电压与电流的相位关系

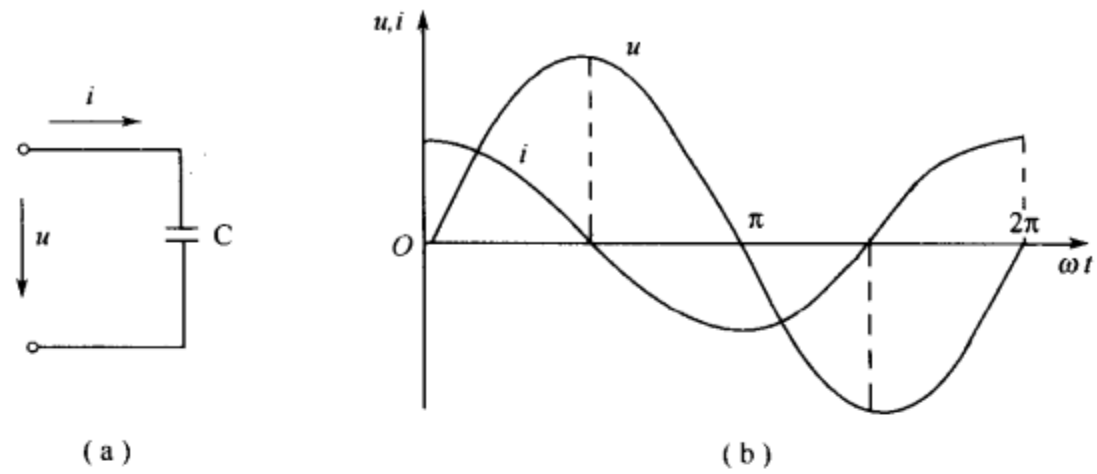
如图 6-31(a)是一个电容元件与正弦电源联结的电路，电路中电流 i 和电容器两端的电压 u 的正方向如图中所示。

当电压发生变化时，电容器极板上的电量也要随着发生变化，在电路中就引起电流，如果在电容器两端加上一正弦电压 $u=U_m\sin\omega t$，经过推算可得：

$$i=I_m\sin(\omega t+90^\circ)$$

式中，$I_m=U_m\omega C$。可见，纯电容电路中，在相位上，电流比电压超前 90°，表示电压 u 与电流 i 的正弦波形如图 6-31(b)所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载



(a)　　(b)

图 6-31　电容元件上的交流电路

4. 纯电容电路功率消耗

(1)瞬时功率

设电流 $u=U_m\sin\omega t$，$i=I_m\sin(\omega t+90°)$，则瞬时功率为：

$$p=p_C=ui=U_mI_m\sin\omega t\sin(\omega t+90°)$$

$$=U_mI_m\sin\omega t\cos\omega t=\frac{U_mI_m}{2}\sin2\omega t$$

由于$\frac{U_mI_m}{2}=UI$，因此

$$p=UI\ \sin2\omega t \tag{6-21}$$

由式(6-21)可知，瞬时功率 p 是一个幅值为 UI，并以 2ω 的角频率随时间而变化的交变量，其变化波形如图 6-32 所示。

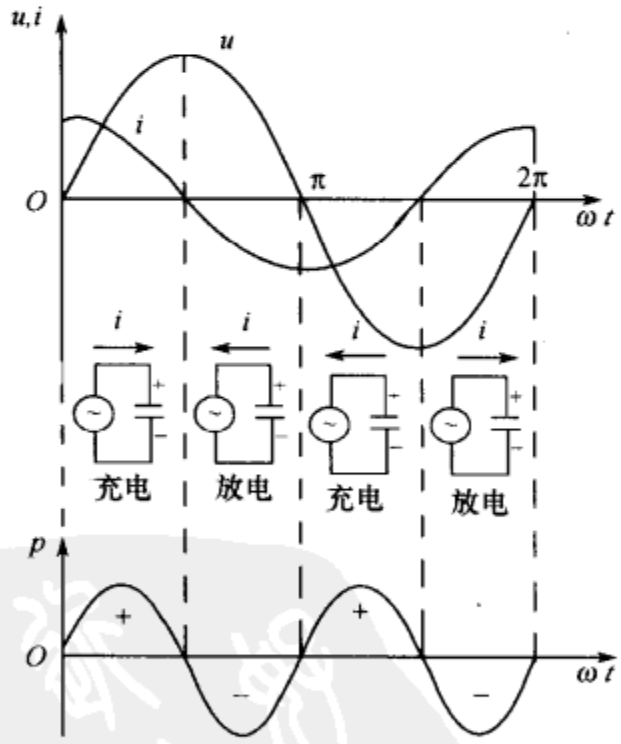


图 6-32　瞬时功率变化波形

在第一个和第三个 1/4 周期内，电压值在增高，使电容元件充电，这时，电容元件从电源取用电能而储存在它的电场中，所以 p 是正的。在第二个和第四个 1/4 周期内，电压值在降低，电容元件在放电，这时，电容元件放出在充电时储存的能量，把它归还给电源，所以 p 是负的。

(2)无功功率和有功功率

在纯电容电路中，平均功率 $P=0$，即有功功率等于 0。关于这一点，从瞬时功率的波形中也容易看出。这说明电容元件是不消耗能量的，在电源与电容元件之间只发生能量的互换，能量互换的规模用无功功率 Q_C 来衡量。它等于瞬时功率 p 的幅值，我们常将电容上的无功功率称为容性无功，其值为负，而将电感的无功功率称为感性无功，其值为正。根据这一规定，则电容上的无功功率为：

$$Q_C=-UI=-I^2X_C \tag{6-22}$$

例 6： 把一个 25μF 的电容元件接到频率为 50Hz、电压有效值为 10V 的正弦电源上，

问：电流是多少？如保持电压值不变，而电源频率改变为 5000Hz，这时电流将为多少？

解：当 $f=50\text{Hz}$ 时

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\times 3.14\times 50\times 25\times 10^{-6}}=127.4(\Omega)$$

$$I=\frac{U}{X_C}=\frac{10}{127.4}=0.078(\text{A})=78(\text{mA})$$

当 $f=5000\text{Hz}$ 时

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\times 3.14\times 5000\times 25\times 10^{-6}}=1.274(\Omega)$$

$$I=\frac{U}{X_C}=\frac{10}{1.274}=7.85(\text{A})$$

可见，在电压值一定时，频率愈高，通过电容元件上的电流愈大。

例 7：设有一个电容量为 $50\mu\text{F}$ 的电容器，接在频率为 50Hz、电压有效值为 10V 的交流电源上，求电流与无功功率是多少？当电源频率变为 2500Hz，而其他不变时，电路中的电流与无功功率又是多少？

解：当 $f=50\text{Hz}$ 时

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\times 3.14\times 50\times 50\times 10^{-6}}=63.7(\Omega)$$

$$I=\frac{U}{X_C}=\frac{10}{63.7}=0.157(\text{A})$$

$$Q_C=-UI=-10\times 0.157=-1.57(\text{var})$$

当 $f=2500\text{Hz}$ 时

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\times 3.14\times 2500\times 50\times 10^{-6}}=1.274(\Omega)$$

$$I=\frac{U}{X_C}=\frac{10}{1.274}=7.85(\text{A})$$

$$Q_C=-UI=-10\times 7.85=-78.5(\text{var})$$

归纳总结：电感元件与电容元件的差别

电感上电压超前电流 90°，而电容元件则是电压滞后电流 90°；另一方面，感抗与容抗的频率特性不同，电感是通直隔交，对低频显示很小的阻碍作用，而电容是通交隔直，对高频显示很小的阻碍作用。

此外，二者的功率也有差别，当电容与电感流过相同电流时，二者的功率流向是相反的，即当电感从电源吸收功率时，电容刚好向电源发出功率，并用感性无功与容性无功来表示这种差别。电感的感性无功功率 $Q_L=UI=I^2X_L$，电容的容性无功功率 $Q_C=-UI=-I^2X_C$。

四、RLC 串联交流电路

1. RLC 串联电路电压与电流的关系

电阻、电感与电容元件串联的交流电路如图 6-33 所示。电路的各元件通过同一电流，电流与各个电压的正方向如图中所示。

分析这种电路可以应用前面纯电阻、纯电感、纯电容电路时所得的结果。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

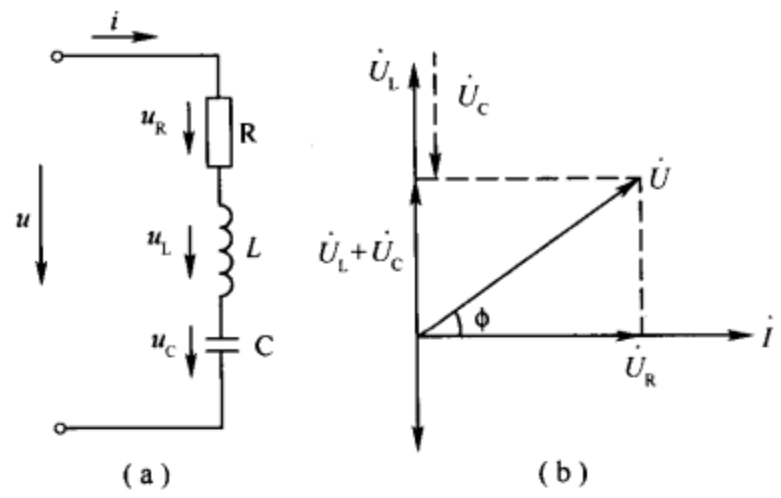


图 6-33　电阻、电感与电容元件串联的交流电路

(a)电路图；(b)向量图。

根据基尔霍夫电压定律可列出：

$$u=u_R+u_L+u_C$$

设电流

$$i=I_m\sin\omega t$$

为参考正弦量，则电阻元件上的电压 u_R 与电流同相，即

$$u_R=I_mR\sin\omega t=U_{Rm}\sin\omega t$$

电感元件上的电压 u_L 比电流超前 90°，即

$$u_L=I_m\omega L\sin(\omega t+90°)=U_{Lm}\sin(\omega t+90°)$$

电容元件上的电压 u_C 比电流滞后 90°，即：

$$u_C=\frac{Im}{\omega C}\sin(\omega t-90°)=U_{Cm}\sin(\omega t-90°)$$

在以上各式中，

$$\frac{U_{Rm}}{I_m}=\frac{U_R}{I}=R$$

$$\frac{U_{Lm}}{I_m}=\frac{U_L}{I}=\omega L=X_L$$

$$\frac{U_{Cm}}{I_m}=\frac{U_C}{I}=\frac{1}{\omega L}=X_C$$

同频率的正弦量相加，所得的仍为同频率的正弦量，所以电源电压为：

$$u=u_R+u_L+u_C=U_m\sin(\omega t+\phi)$$

其幅值为 U_m，与电流之间的相位差为 ϕ，利用向量图来求幅值 U_m 和相位差 ϕ 最为方便。如果将电压 u_R、u_L、u_C 用向量 $\dot{U}_R$、$\dot{U}_L$、$\dot{U}_C$ 表示，则向量相加即可得出电源电压 u 的向量 $\dot{U}$。由电压向量 $\dot{U}$、$\dot{U}_R$ 及 $(\dot{U}_L+\dot{U}_C)$ 所组成的直角三角形，称为电压三角形，利用这个电压三角形，可求得电源电压的有效值，即

$$U=\sqrt{U_R^2+(U_L-U_C)^2}=\sqrt{(IR)^2+(LX_L-LX_C)^2}=I\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}$$

也可写为：

$$\frac{U}{I}=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}$$

由上式可见，这种电路中电压与电流的有效值(或幅值)之比为 $\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}$，它的单位也是欧姆，也具有对电流起阻碍作用的性质，称它为电路的阻抗，用 $|Z|$ 表示：

$$|Z|=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2} \tag{6-23}$$

可见，$|Z|$、R、(X_L-X_C)三者之间的关系也可用一个直角三角形——阻抗三角形来表示，如图 6-34 所示。

至于电源电压 u 与电流 i 之间的相位差 ϕ 也可从电压三角形中得出，即

$$\tan\phi=\frac{U_L-U_C}{U_R}$$

所以

$$\phi=\arctan\frac{U_L-U_C}{U_R}=\arctan\frac{X_L-X_C}{R} \tag{6-24}$$

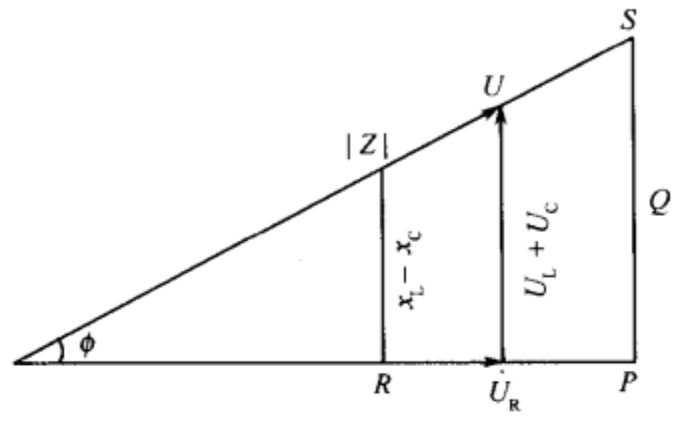


图 6-34　功率、电压、阻抗三角形

因此，阻抗 $|Z|$、电阻 R、感抗 X_L 及容抗 X_C 不仅表示了电压 u 及其分量 u_R、u_L 及 u_C 与电流 i 之间的大小关系，而且也表示了它们之间的相位关系。随着电路参数的不同，电压 u 与电流 i 之间的相位差 ϕ 也就不同。因此，ϕ 角的大小是由电路（负载）的参数决定的。

由式(6-24)看来，在频率一定时，不仅相位差 ϕ 的大小取决于电路的参数，而且电流滞后还是超前于电压，也与电路的参数有关。如果 $X_L>X_C$，即 $\phi>0$，则在相位上电流 i 比电压 u 滞后 ϕ 角，这种电路是电感性的。如果 $X_L<X_C$，即 $\phi<0$，则电流 i 比电压 u 超前 ϕ 角，这种电路是电容性的。当然，也可以使 $X_L=X_C$，即 $\phi=0$，则电流 i 与电压 u 同相，这种电路是电阻性的。

重点提示：在检修荧光灯电路时，用万用表交流电压挡分别测量灯管和镇流器上的电压，如果有灯管两端电压为 148V，镇流器两端电压为 166V，两部分电压加起来达 314V，比电源电压 220V 高出 94V 的情况。这是交流电路中的正常现象，要得到问题的答案，需从前面学过的含有电感的交流电路谈起。

在电阻 R 与电感 L 串联的交流电路中，电源电压 $\dot{U}$ 等于电阻电压降 $\dot{U}_R$ 与电感电压降 $\dot{U}_L$ 之和，即

$$\dot{U}=\dot{U}_R+\dot{U}_L$$

根据前面得出的相位关系，电阻电压降 $\dot{U}_R$ 与电流 $\dot{I}$ 同相，电感电压降 $\dot{U}_L$ 超前电流 90°，由此可以画出向量图。将 $\dot{U}_R$、$\dot{U}_L$ 进行向量相加后，就得到外加电压 $\dot{U}$。从向量图中可以看出，$U\neq U_R+U_L$，即电源电压的有效值不等于电阻与电感两端电压的有效值之和。

至此，前面提出的荧光灯电路中，灯管电压 $U_R=148\text{V}$，镇流器电压 $U_L=166\text{V}$，按 $\dot{U}=\dot{U}_R+\dot{U}_L$ 算出正好等于电源电压 220V，问题得出了答案。

2. RLC 串联电路的功率

(1)瞬时功率

知道了 u 与 i 的变化规律与相互关系后，便可求出瞬时功率，即

$$p=ui=U_m I_m\sin(\omega t+\phi)\sin\omega t$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

经整理后得

$$p=UI\cos\phi-UI\cos(2\omega t+\phi)$$

(2)平均(有功)功率和无功功率

由于电阻元件上要消耗电能,经计算,可得电阻元件上的平均功率为:

$$P=UI\cos\phi \tag{6-25}$$

而电感元件与电容元件要储放能量,即它们与电源之间要进行能量互换,相应的无功功率可根据式(6-18)和式(6-22)得出,并考虑到U_L和U_C相位相反,于是

$$Q=(U_L-U_C)I=I^2(X_L-X_C)=UI\sin\phi \tag{6-26}$$

式(6-25)和式(6-26)是计算正弦交流电路中平均功率(有功功率)和无功功率的一般公式。

由上述可知,一个交流发电机输出的功率不仅与发电机的端电压及其输出电流的有效值的乘积有关,而且还与电路(负载)的参数有关。电路所具有的参数不同,则电压与电流间的相位差ϕ就不同,在同样电压U和电流I之下,这时电路的有功功率和无功功率也就不同。公式$P=UI\cos\phi$中的$\cos\phi$称为功率因数。

(3)视在功率

在交流电路中,平均功率一般不等于电压与电流有效值的乘积。如将电压与电流的有效值相乘,则得出视在功率S,即

$$S=UI=I^2|Z| \tag{6-27}$$

交流电气设备是按照规定了的额定电压U_N和额定电流I_N来设计和使用的。变压器和有些交流发电机的容量就是以额定电压和额定电流的乘积,即所谓额定视在功率$S_N=U_NI_N$来表示的。视在功率的单位是伏安(VA)或千伏安(kV·A)。

由于平均功率P、无功功率Q和视在功率S三者所代表的意义不同,为了区别起见,各采用不同的单位。

这三个功率之间有一定的关系,即

$$S=\sqrt{P^2+Q^2} \tag{6-28}$$

显然,它们也可以用一个直角三角形——功率三角形来表示。

功率、电压和阻抗三角形是相似的,现在把它们同时表示在图6-34中。引出这三个三角形的目的,主要是为了帮助我们分析与记忆。

应当注意,功率P、Q及S都不是正弦量,所以不能用向量表示。

在前面的分析中,介绍了电阻、电感与电容元件串联的交流电路,但在实际生活中常见到的是电阻与电感元件串联的电路(电容的作用可忽略不计)和电阻与电容元件串联的电路(电感的作用可忽略不计)。

归纳总结:直流电路与交流电路的区别

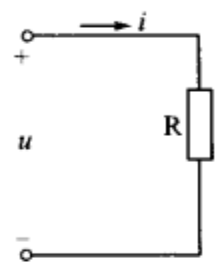
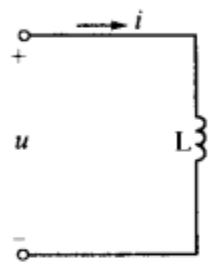
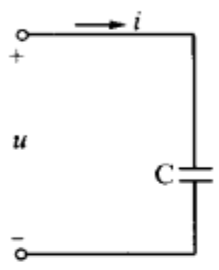
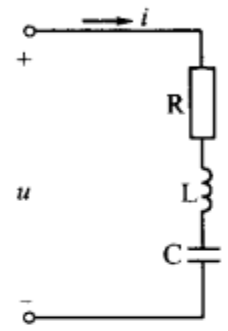
(1)直流电路

纯直流电路简称直流电路。电路的各个电动势、端电压、电流的大小和方向在工作中不变化。分析的基本定理是欧姆定律、基尔霍夫定律、叠加原理、戴维南定理等。在直流电路中,电容器是不导电的,对直流电流起到隔断作用,简称隔直作用。而电感线圈对直流电流不产生直流电压降,可视为直流电阻为零。直流电路也不存在相位问题,不存在无功功率和视在功率,只有有功功率。

(2)交流电路

正弦交流电路简称交流电路。电路中的各个电压与电流都按正弦规律交变着工作，方向在一个周期中分正半周和负半周，大小从零变化到峰值又变为零。正弦量有三个要素：振幅(峰值)、周期和初相位。在正弦交流电路中，电感使电流落后，电容使电流超前，并且都是储性元件，不消耗功率、不发热。交流电路中电压与电流的关系(大小和相位)有一定的规律性，见表 6-1，它可以帮助读者总结和记忆。

表 6-1　交流电路分析一览表

交流电路		纯电阻电路	纯电感电路	纯电容电路	电阻、电感与电容串联电路
电路图					
电压电流关系	大小关系	$U=RI$	$U=X_L I=\omega L I$	$U=X_C I=\frac{1}{\omega C}I$	$U=\lvert Z\rvert I$ $\lvert Z\rvert=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}$
	相位关系	 电压与电流同相	 电压超前电流 90°	 电压滞后电流 90°	 $\phi=\arctan\frac{X_L-X_C}{R}$
功率计算	有功功率	$P=UI=RI^2=\frac{U^2}{R}$	$P=0$	$P=0$	$P=UI\cos\phi=RI^2$
	无功功率	$Q=0$	$Q=UI=X_L I^2=\frac{U^2}{X_L}$	$Q=-UI=-X_C I^2$ $=-\frac{U^2}{X_C}$	$Q=UI\sin\phi=(X_L-X_C)I^2$

实际电路中，常常是直流与交流电同时存在，这时要把电路按直流电路和交流电路分开，再使用直流电路分析法和交流电路分析法分别计算。

下面简要提示一下 R、L、C 并联的电路的有关计算公式。设 R、L、C 每个元件两端的电压有效值为 U，每条分路电流和电压的关系为：

$$I_C=\frac{U}{X_C}$$

$$I_L=\frac{U}{X_L}$$

$$I_R=\frac{U}{R}$$

不过，不同元件上电流相位各有差异，这时，电路的总电流与分电流间的关系是：

$$I=\sqrt{I_R^2+(I_L-I_C)^2}$$

这时的总阻抗 $|Z|$ 满足关系：

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$\frac{1}{|Z|}=\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2+\left(\frac{1}{X_L}-\frac{1}{X_C}\right)^2}$$

例 8：在电阻、电感、电容元件相串联的电路中，$R=30\Omega$，$L=127\text{mH}$，$C=40\mu\text{F}$，电源电压 $u=220\sqrt{2}\sin(314t+20°)\text{V}$，试求：①感抗、容抗和阻抗；②电流的有效值 I 与瞬时值 i 的表示式；③各部分电压的有效值与瞬时值的表示式；④功率 P 和 Q。

解：①$X_L=\omega L=314\times127\times10^{-3}=40(\Omega)$

$$X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{314\times40\times10^{-6}}=80(\Omega)$$

$$|Z|=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=\sqrt{30^2+(40-80)^2}=50(\Omega)$$

② 电流的有效值为：

$$I=\frac{U}{|Z|}=\frac{220}{50}=4.4(\text{A})$$

电源电压 u 与电流 i 的相位差为：

$$\phi=\arctan\frac{X_L-X_C}{R}=\arctan\frac{40-80}{30}=-53°$$

ϕ 为负值说明电压 u 滞后于电流 i，电路呈电容性。因此，i 的瞬时表达式为：

$$i=4.4\sqrt{2}\sin(314t+20°+53°)=4.4\sqrt{2}\sin(314t+73°)(\text{A})$$

③$U_R=IR=4.3\times30=132(\text{V})$

$$u_R=132\sqrt{2}\sin(314t+73°)(\text{V})$$

$$U_L=IX_L=4.4\times40=176(\text{V})$$

$$u_L=176\sqrt{2}\sin(314t+73°+90°)=176\sqrt{2}\sin(314t+163°)(\text{V})$$

$$U_C=IX_C=4.4\times80=352(\text{V})$$

$$u_C=352\sqrt{2}\sin(314t+73°-90°)=352\sqrt{2}\sin(314t-17°)(\text{V})$$

显然 $$U\neq U_R+U_L+U_C$$

④ $P=UI\cos\phi=220\times4.4\cos(-50°)=220\times4.4\times0.6=580.8(\text{W})$

$Q=UI\sin\phi=220\times4.4\sin(-53°)=220\times4.4(-0.8)=-774.4(\text{var})$(电容性)

例 9：有一个 RC 电路，如图 6-35 所示，$R=2\text{k}\Omega$，$C=0.1\mu\text{F}$，输入端接正弦信号源 $U_i=1\text{V}$，$f=500\text{Hz}$。求：①输出电压 U_o，并讨论输入电压与输出电压的大小与相位关系；②当将电容 C 改为 $20\mu\text{F}$，求输出电压 U_o，并讨论输入电压与输出电压的大小与相位关系；③若将频率 f 改为 4000Hz，再求输出电压 U_o，并讨论输入电压与输出电压的大小与相位关系。

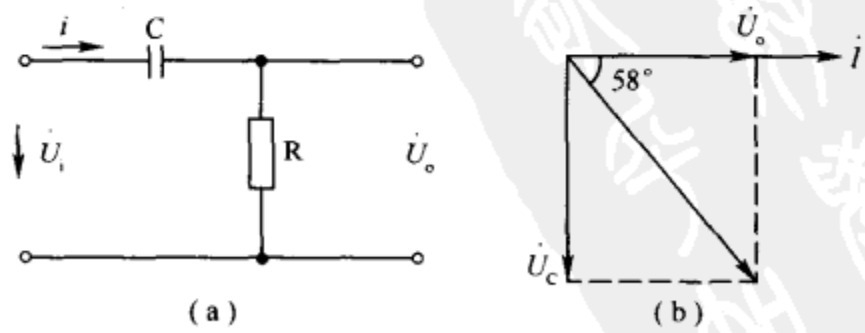


图 6-35　例 9 图

解：①$X_C=\dfrac{1}{2\pi fC}=\dfrac{1}{2\times3.14\times500\times0.1\times10^{-6}}=3200(\Omega)=3.2(k\Omega)$

$$|Z|=\sqrt{R^2+X_C^2}=\sqrt{2^2+3.2^2}=3.77(k\Omega)$$

$$I=\frac{U_i}{|Z|}=\frac{1}{3.77}=0.27(mA)$$

$$U_o=IR=0.27\times2=0.54V$$

$$\phi=\arctan\frac{-X_C}{R}=\arctan\frac{-3.2}{2}=-58^\circ$$

ϕ为负值，说明电流$\dot{I}$超前输入电压$\dot{U}_i$的相位58°。电压与电流的向量图如图(b)所示。$\dfrac{U_o}{U_i}=\dfrac{0.54}{1}=54\%$，$\dot{U}_o$比$\dot{U}_2$超前58°。

②$X_C=\dfrac{1}{2\pi fC}=\dfrac{1}{2\times3.14\times500\times20\times10^{-6}}=16\Omega$

$$|Z|=\sqrt{R^2+X_C^2}=\sqrt{2000^2+16^2}\approx2(k\Omega)$$

$$U_o\approx U_i,\phi\approx0^\circ,U_C\approx0$$

③$X_C=\dfrac{1}{2\pi fC}=\dfrac{1}{2\times3.14\times4000\times0.1\times10^{-6}}=400(\Omega)=0.4(k\Omega)$

$$|Z|=\sqrt{R^2+X_C^2}=\sqrt{2^2+0.4^2}\approx2.04(k\Omega)$$

$$I=\frac{U_i}{|Z|}=\frac{1}{2.04}=0.49(mA)$$

$$U_o=IR=0.49\times2=0.98(V)$$

$$\phi=\arctan\frac{-X_C}{R}=\arctan\frac{-0.4}{2}=-11.3^\circ$$

$\dfrac{U_o}{U_i}=\dfrac{0.98}{1}=98\%$，$\dot{U}_o$比$\dot{U}_i$超前11.3°。

重点提示：通过本例可了解下列两个问题：

① 图6-35(a)实际上是晶体管交流放大器中常用的RC耦合电路。串联电容器C的目的是为了要隔断直流(输入端往往有直流)。但是在传递交流信号时，又不希望电容器C上有电压损失(电压降)而要求输入电压基本上能传递到输出端。为此，要根据信号频率选择电容值的大小，使$X_C\ll R$。

②图6-35(a)也是一种移相电路，U_o的相位与U_i不同，改变C或R的数值都能达到移相的目的。

③输出电压的大小和相位随着信号频率的不同而发生变化。这是因为频率愈高，容抗愈小，电容器C的分压作用也就愈小。

第五节　功率因数的提高

一、功率因数降低的原因

我们知道，直流电路的功率等于电流与电压的乘积，但交流电路则不然。在计算交流电路的平均功率(有功功率)时，还要考虑电压与电流间的相位差ϕ，即

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$P=UI\cos\phi$$

上式中的 $\cos\phi$ 是电路的功率因数。在前面已讲过，电路的功率因数取决电路（负载）的参数。只有在电阻性负载（例如白炽灯、电阻炉等）的情况下，电压和电流才同相，其功率因数为 1。对其他负载来说，如排风扇、抽油烟机等，既有电阻又有电抗，存在着电压与电流之间的相位角 ϕ。这类电感性负载的功率因数都较低，一般为 0.5～0.6，说明交流（AC）电源设备的额定容量不能充分利用，输出大量的无功功率，致使输电效率降低。

除线路电压与电流之间的相位角 ϕ 引起功率因数下降外，输入电流或电压的波形失真也是引起功率因数下降的重要原因。长期以来，像开关型电源和电子镇流器等产品，都是采用桥式整流和大容量电容滤波电路来实现AC-DC 转换的。由于滤波电容的充、放电作用，在其两端的直流电压出现略呈锯齿波的纹波。滤波电容上电压的最小值远非为零，与其最大值（纹波峰值）相差并不多。根据桥式整流二极管的单向导电性，只有在 AC 线路电压瞬时值高于滤波电容上的电压时，整流二极管才会因正向偏置而导通，而当 AC 输入电压瞬时值低于滤波电容上的电压时，整流二极管因反向偏置而截止。也就是说，在 AC 线路电压的每个半周期内，只是在其峰值附近，二极管才会导通（导通角约为 70°）。虽然 AC 输入电压仍大体保持正弦波波形，但 AC 输入电流却呈高幅值的尖峰脉冲，如图 6-36 所示。这种严重失真的电流波形含有大量的谐波成分，引起线路功率因数严重下降。

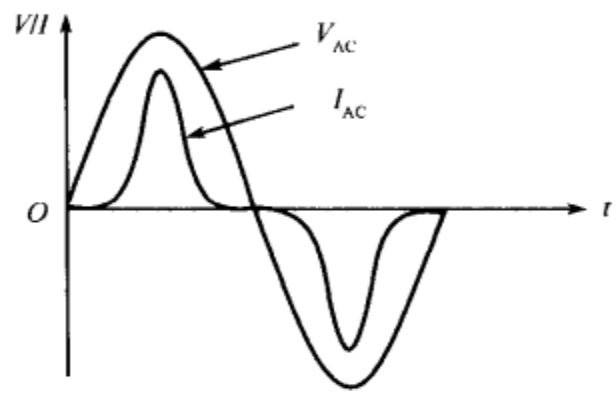


图 6-36　AC 输入电压与电流波形

二、提高功率因数的措施

为提高负载功率因数，往往采取补偿措施。最简单的方法是在电感性负载两端并联电容器，这种方法称为并联补偿。并联补偿的电路图和向量图如图 6-37 所示，其中，ϕ_1 为感性负载电流 $\dot{I}_1$ 与输入电压 $\dot{U}$ 的相位差，ϕ 为并联电容器后线路电流 $\dot{I}$ 与输入电压 $\dot{U}$ 的相位差。

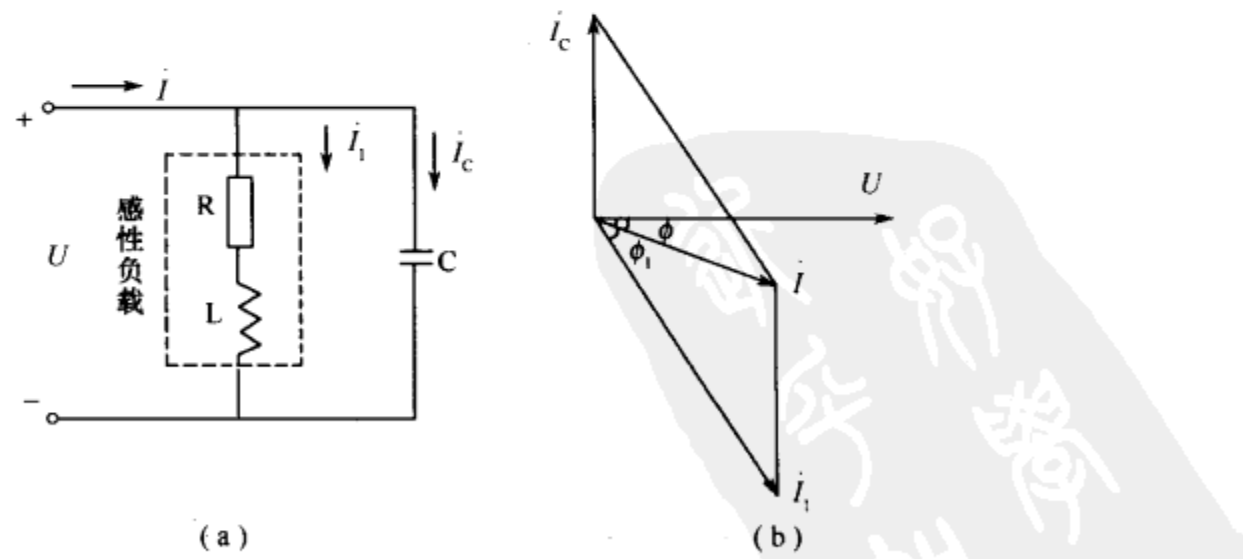


图 6-37　感性负载并联电容器提高功率因数

并联电容器以后，电感性负载的电流 $I_1=\dfrac{U}{\sqrt{R^2+X_L^2}}$ 和功率因数 $\cos\phi_1=\dfrac{R}{\sqrt{R^2+X_L^2}}$ 均未变化，但电压 u 和线路电流 i 之间的相位差 ϕ 变小了，即 $\cos\phi$ 变大了。这里所讲的提高功率因数，是指提高电源或电网的功率因数，而不是指提高某个电感性负载的功率因数。

如果电容值选择适当，还可以使 $\phi=0$。在电感性负载上并联了电容器以后，减少了电源与负载之间的能量互换，这时电感性负载所需的无功功率，大部分或全部是就地供给（由电容器供给）。就是说，能量的互换现在主要或完全发生在电感性负载与电容器之间；因而使发电机容量能得到充分利用。应该注意，并联电容器以后，有功功率并未改变，因为电容器是不消耗电能的。

除并联补偿方法外，还可采用专门的功率因数校正电路（简称 PFC）。PFC 不同于传统的并联补偿，它是针对非正弦电流波形而采取的提高线路功率因数，迫使 AC 线路电流追踪电压波形的瞬时变化轨迹，并使电流与电压保持同相位，使系统呈纯电阻性的技术措施。

例 10： 证明：对于图 6-37 所示的感性负载，若将 $\cos\phi_1$ 提高到 $\cos\phi$，则并联电容为

$$C=\frac{P}{\omega U^2}(\tan\phi_1-\tan\phi)$$

证明：根据向量图可得：

$$I_C=\omega CU=I_1\sin\phi_1-I\sin\phi$$

由于

$$I_1=\frac{P}{U\cos\phi_1},\ I_1=\frac{P}{U\cos\phi}$$

所以

$$I_C=\frac{P}{U}\left(\frac{\sin\phi_1}{\cos\phi_1}-\frac{\sin\phi}{\cos\phi}\right)=\frac{P}{U}(\tan\phi_1-\tan\phi)$$

因此

$$C=\frac{P}{\omega U^2}(\tan\phi_1-\tan\phi) \qquad (6\text{-}29)$$

例 11： 一个 220V、40W 的日光灯，功率因数 $\cos\phi_1=0.5$，电源电压 $U=220\text{V}$，$f=50\text{Hz}$，如果将 $\cos\phi_1$ 提高到 $\cos\phi=0.95$，试计算：①需要并联电容器的电容量 C；②比较并联电容前后供电线路的电流。

解：①因为 $\cos\phi_1=0.5$，$\cos\phi=0.95$

所以

$$\tan\phi_1=1.732,\ \tan\phi=0.329$$

由向量图得

$$C=\frac{P}{\omega U^2}(\tan\phi_1-\tan\phi)=\frac{40}{2\times3.14\times50\times220^2}\times(1.732-0.329)=3.69(\mu\text{F})$$

② 并联电容前，供电线路的电流为 I'，并联电容后，供电线路的电流为 I，则

$$I'=\frac{P}{U\cos\phi_1}=\frac{40}{220\times0.5}=0.364(\text{A})$$

$$I=\frac{P}{U\cos\phi}=\frac{40}{220\times0.95}=0.191(\text{A})$$

可见，并联电容后，电路的功率因数提高，供电线路上的电流降低。

第六节　RC 和LC 电路

在电子技术领域和控制领域中，由电阻、电容和电感构成的电路应用十分广泛，RC、

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

LC 网络可以构成许多用途的电路。下面，结合前面所学知识，归纳介绍几种常见 RC、LC 电路。

一、RC 串联和并联电路

1. RC 串联电路

图 6-38 是 RC 串联电路及其阻抗特性曲线。图(a)中，R、C 串联，由于 C 对各种频率信号的容抗是不同的，这样整个 RC 电路的阻抗特性便如图(b)所示。

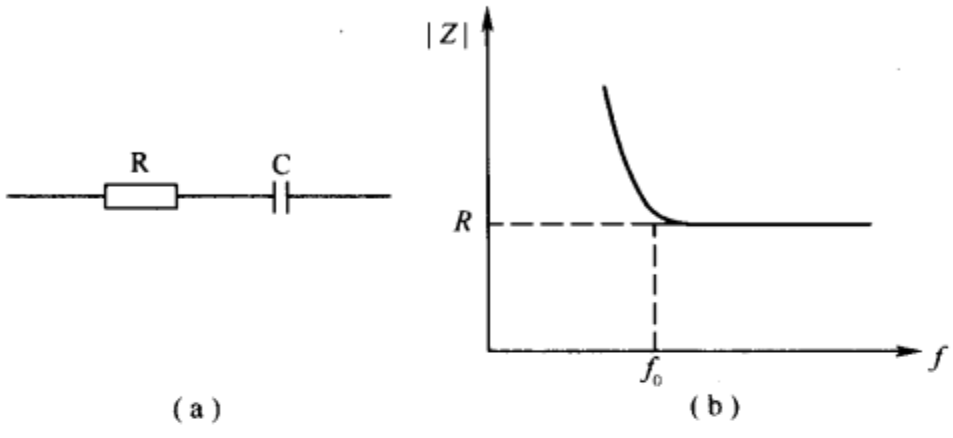


图 6-38　RC 串联电路

这一 RC 电路对各频率信号呈现不同的阻抗。当信号频率大于转折频率 f_0 后，C 的容抗($X_C=\frac{1}{2\pi fC}$)几乎为零，由 RC 串联电路阻抗公式 $|Z|=\sqrt{R^2+X_C^2}$ 可知，$|Z|\approx R$，这时 RC 串联电路的总阻抗由 R 的大小来决定。当信号频率低于 f_0 时，由于信号频率已较低了，C 的容抗已较大而不能忽视，此时 RC 串联电路的总阻抗为 R 和 C 容抗之和。又因为 C 的容抗随频率降低而增大，所以特性曲线中频率 f 小于 f_0 的一段是上升的，这样，频率愈低，阻抗愈大。这一 RC 串联电路的转折频率 f_0 由下式决定：

$$f_0=\frac{1}{2\pi RC} \tag{6-30}$$

当 R 不变时，C 大，转折频率小；反之，C 小，转折频率大。同样，通过改变 R 的大小也可以改变 f_0。

2. RC 并联电路

图 6-39 所示是 RC 并联电路及其的阻抗特性曲线。

这一电路的阻抗特性曲线也有一个转折频率 f_0，f_0 由式(6-31)决定：

$$f_0=\frac{1}{2\pi RC} \tag{6-31}$$

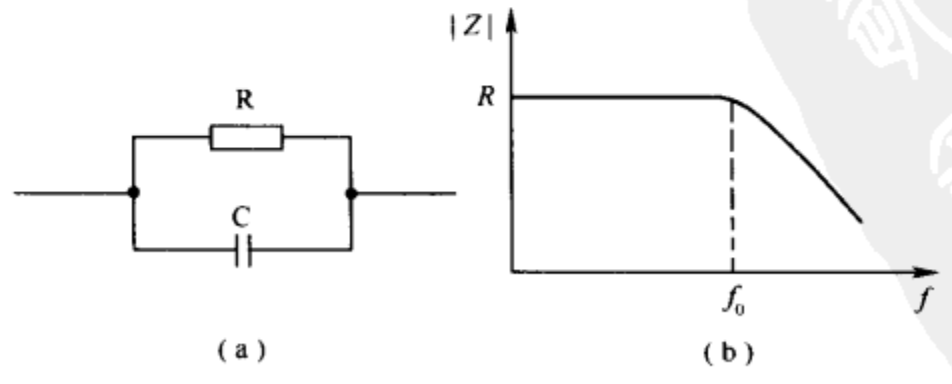


图 6-39　RC 并联电路

当信号频率低于转折频率 f_0 时，频率愈低，C 的容抗愈大于 R。此时 C 相当于开路，RC 并联网络阻抗由 R 决定，小于 f_0 部分为平直线，大小为 R 阻值。

当信号频率大于转折频率 f_0 时，C 的容抗可以与 R 阻值比较，此时总的阻抗是 R 和 C 的容抗的并联值。由于频率升高后 C 的容抗下降，所以 RC 并联电路总的阻抗斜率下降，且频率愈高，网络的阻抗愈小。改变 C 或 R 大小时，转折频率也要做相应改变。

3. RC 串并联电路

RC 串并联电路及其阻抗特性曲线如图 6-40 所示。这里不再分析。

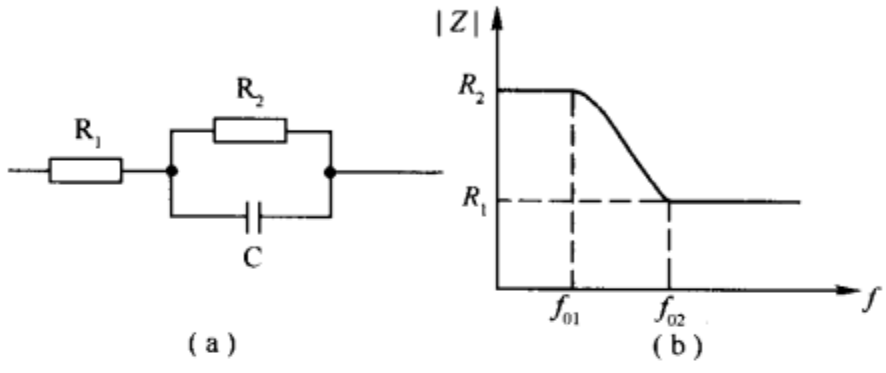


图 6-40　RC 串并联电路

二、滤波器

滤波器是一种让某一频带内信号通过，同时又阻止这一频带外信号通过的电路。滤波器分为无源滤波器和有源滤波器。

无源滤波器又分为：RC 滤波器和 LC 滤波器。RC 滤波器又分为：低通 RC 滤波器、高通 RC 滤波器和带通 RC 滤波器；LC 滤波器又分为低通 LC 滤波器、高通 LC 滤波器和带通 LC 滤波器。

有源滤波器分为有源高通滤波器、有源低通滤波器和有源带通滤波器等。

下面简要分析 RC 和 LC 无源滤波器。

1. RC 滤波器

(1)低通 RL 滤波器

图 6-41 是一种 RC 无源低通滤波器。图(a)是低通滤波器电路，图(b)是它的输出信号特性曲线。可以看出，低通滤波器的作用是让低于转折频率 f_0 的低频段信号通过，而将高于转折频率 f_0 的信号去掉。

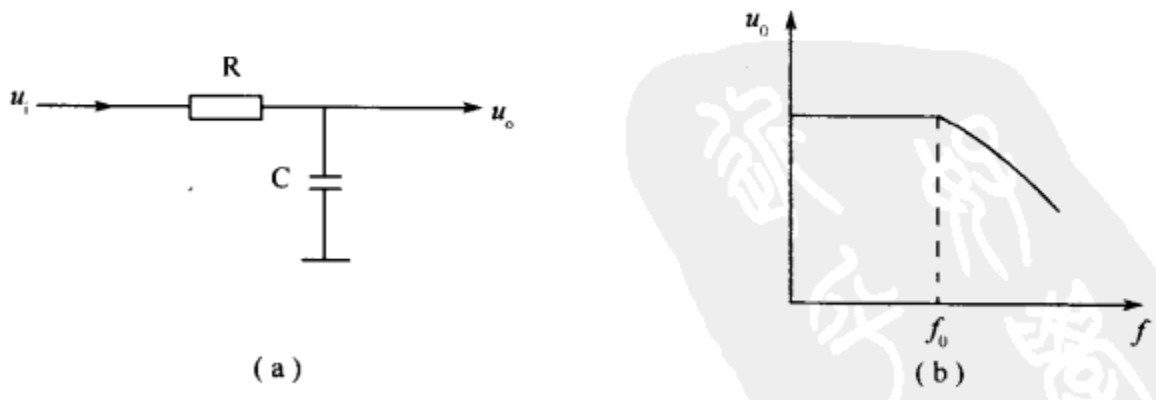


图 6-41　低通 RC 滤波器

这一低通滤波器的工作原理是，当输入信号 u_i 中频率低于转折频率 f_0 的信号加到电路中时，由于 C 的容抗很大而无分流作用，所以这一低频信号经 R 输出。当 u_i 中频率

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

高于转折频率 f_0 时，因 C 的容抗已很小，故通过 R 的高频信号由 C 分流到地而无输出，达到低通的目的。这种低通 RC 滤波器的转折频率 f_0 由式(6-32)决定：

$$f_0=\frac{1}{2\pi RC} \tag{6-32}$$

(2)高通 RC 滤波器

图 6-42 是 RC 元件构成的高通滤波器。图(a)是电路，图(b)是它的输出信号特性曲线。从这一曲线可以看出，当输入信号 u_i 中频率低于转折频率 f_0 时，输出受到明显的衰减。高于转折频率 f_0 的信号输出增大。

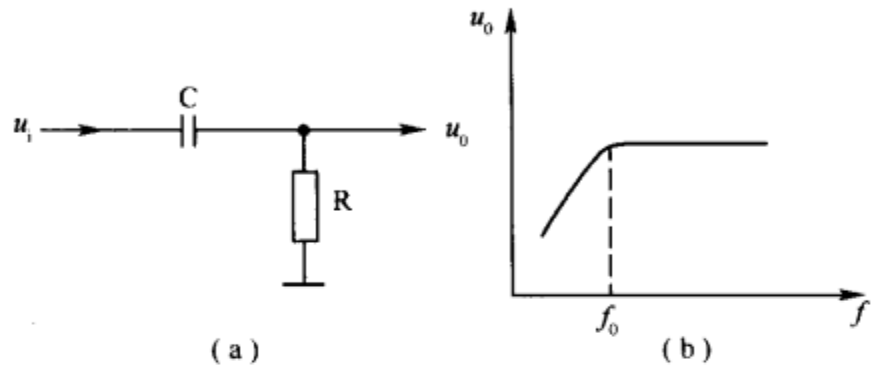


图 6-42　高通滤波器

这一电路的工作原理是，当频率低于 f_0 的信号输入这一滤波器时，由于 C 的容抗很大而受到阻止，输出减小，且频率愈低输出愈小。当频率高于 f_0 的信号输入这一滤波器时，由于 C 的容抗很小，故对信号无衰减作用，这样该滤波器具有让高频信号通过，阻止低频信号的作用，这一电路的转折频率 f_0 由式(6-33)决定：

$$f_0=\frac{1}{2\pi RC} \tag{6-33}$$

(3)带通 RC 滤波器

带通滤波器可以让一定频带的信号通过，而阻止频带以外的信号。将高通滤波器和低通滤器串联在一起，适当设计电路参数，就可以构成所需要的带通滤波器。

2. LC 滤波器

LC 滤波器适用于高频信号的滤波，它由电感 L 和电容 C 所组成。由于感抗随频率增加而增加，而容抗随频率增加而减小，因此，LC 低通滤波器的串臂接电感，并臂接电容，高通滤波器的 L、C 位置，则与它相反。带通滤波器则是二者的组合。

三、LC 自由振荡电路

1. 电磁振荡的产生

如图 6-43 所示电路，先把开关扳到电池组一边，给电容器充电；稍后再把开关扳到线圈一边，让电容器通过线圈放电。这时会看到电流表的指针左右摆动，表明电路里产生了大小和方向作周期性变化的交变电流。通常把这样产生的交变电流叫做振荡电流。能够产生振荡电流的电路叫做振荡电路，图中由电感线圈和电容器组成的电路就是一种简单的 LC 振荡电路。

用示波器观察振荡电流，可以看到，在 LC 回路里产生的振荡电流和电压是按正弦规律变化的。

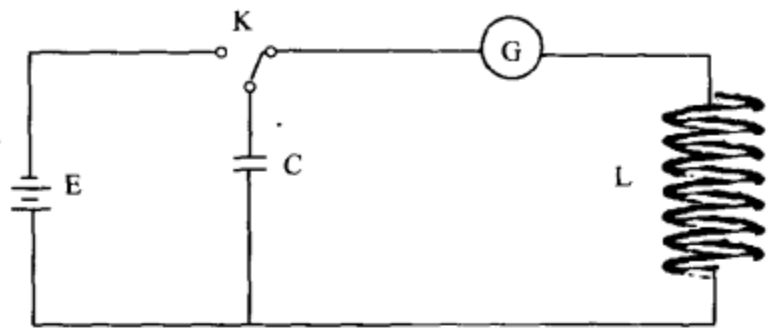


图 6-43　电磁振荡电路

2. 振荡过程

下面分析 LC 回路里产生振荡电流的过程。

$t=0$ 时刻：开关刚扳到线圈一边的瞬间，已被充电的电容器尚未放电，电路里没有电流，电路里的能量全部是电容器里储存的电场能，如图 6-44(a)所示。

$0\sim\frac{T}{4}$ 阶段：电容器开始放电，由于线圈的自感作用，电路里的电流不能立刻达到最大值，而是由零逐渐增大。放电过程中，线圈周围产生磁场，并且随着电流的增大而增强；电容器极板上的电荷逐渐减少，电容器里的电场逐渐减弱。电路里的电场能逐渐转化为磁场能。到放电结束时，电流达到最大值，电容器极板上已经没有电荷，电场能全部转化为磁场能，如图 6-44(b)所示。

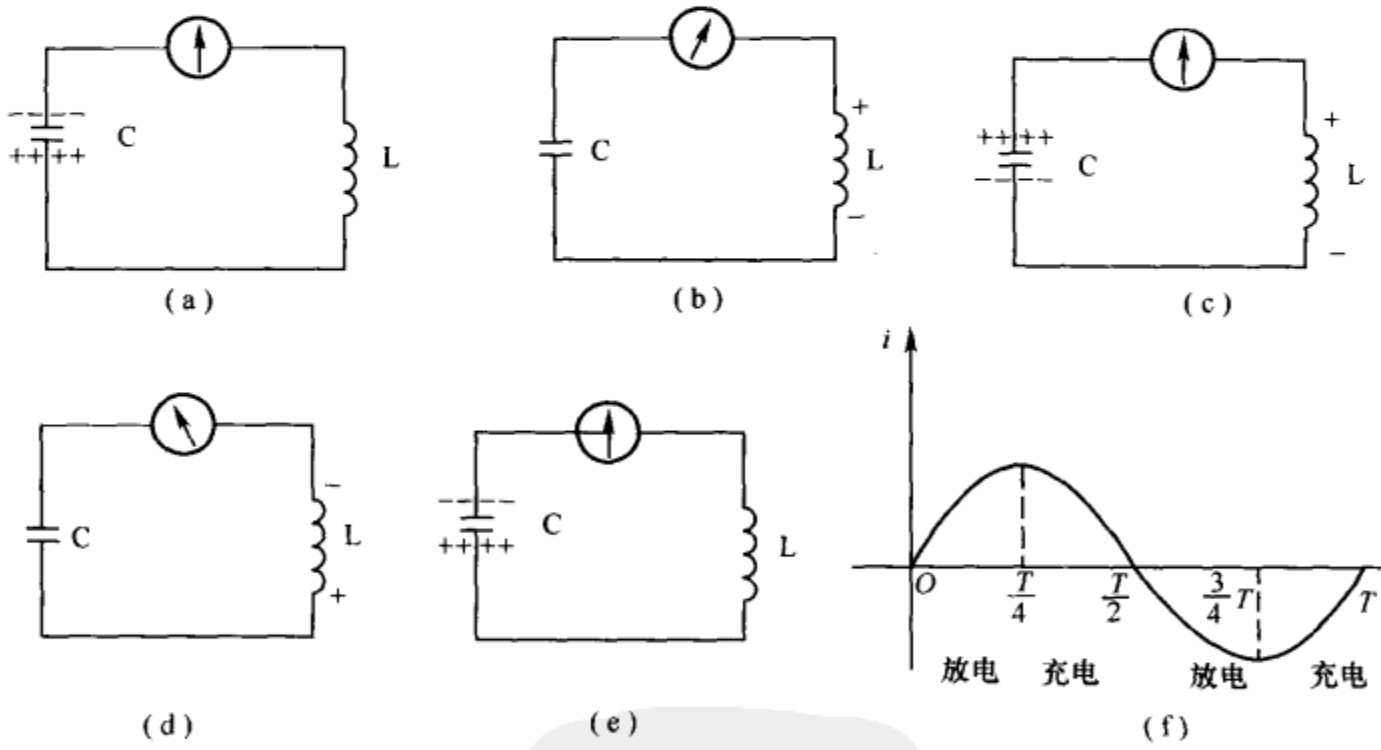


图 6-44　振荡过程和波形

(a)0 时刻；(b)$\frac{T}{4}$ 时刻；(c)$\frac{T}{2}$ 时刻；(d)$\frac{3}{4}T$ 时刻；(e)T 时刻；(f)振荡波形。

$\frac{T}{4}\sim\frac{T}{2}$ 阶段：电容器放电结束后，由于线圈的自感作用，电路里的电流并不立即减小为零，而是保持原来的方向继续流动，使电容器在反方向上重新充电。在反方向充电过程中，随着电流的减小，线圈周围的磁场逐渐减弱；电容器两极板带上相反的电荷，电容器里的电场随着极板上电荷的增多而增强。这样，电路里的磁场能又逐渐转化为电场能，充电结束时，电流减小到零，电容器极板上的电荷达到最大值，磁场能全部转化为电场能，如图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

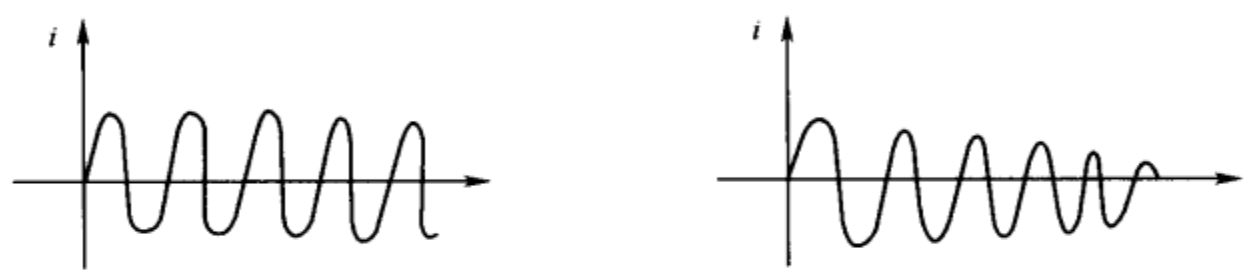
6-44(c)所示。

此后，电容器再放电($\frac{T}{2}\sim\frac{3}{4}$阶段，如图 6-44(d)所示)、再充电($\frac{3}{4}\sim T$ 阶段，如图 6-44(e)所示)，这样不断地充电和放电，电路中就有了振荡电流如图 6-44(f)所示。同时电场能和磁场能发生周期性的转化，这种现象叫做电磁振荡。

图 6-44 中的电磁振荡与机械振动中单摆的自由振动(类似)叫做自由振荡。最初给电容器充电，相当于使单摆的摆锤偏离平衡位置，给摆锤一定的重力势能。电路中电场能和磁场能的相互转化，相当于单摆中重力势能和动能的相互转化。

3. 无阻尼振荡和阻尼振荡

在自由振荡中，如果没有能量损失，振荡应该持续下去，振荡电流的振幅应该保持不变，这种振荡叫做无阻尼振荡，如图 6-45(a)所示。可是，实际上在电磁振荡中总要有能量损失，一部分能量由于电路中有电阻而转化为热，还有一部分能量辐射到周围空间中。这样，振荡电路的能量逐渐损耗，振荡电流的振幅逐渐减小，直到最后停止下来。这种振荡叫做阻尼振荡，如图 6-45(b)所示。



(a)　　(b)

图 6-45　无阻尼振荡和阻尼振荡

(a)无阻尼阻荡；(b)阻尼振荡。

实际工作中常常需要保持振幅不变的等幅振荡，这种等幅振荡要用振荡器来产生，振荡器通过晶体管周期地把电源的能量补充到振荡电路中，补偿振荡过程中的能量损耗，以维持等幅振荡。

4. 电磁振荡的周期和频率

振荡电路里发生无阻尼自由振荡的周期和频率，叫做振荡电路的固有周期和固有频率，简称振荡电路的周期和频率。LC 回路的周期和频率与哪些因素有关呢？首先改变电容和电感的大小，重做图 6-43 的实验。可以看到，电容或电感增加时，周期变长，频率变低；电容或电感减小时，周期变短，频率变高。

上述现象可以这样来说明：加在电容器上的电压一定时，电容器的电容越大，它容纳的电荷就越多，放电和充电需要的时间就越长，因而周期就越长，频率就越低；线圈的电感越大，阻碍电流变化的作用就越强，放电和充电需要的时间就越长，因而周期就越长，频率就越低。

进一步的研究可以证明，周期 T 和频率 f 与自感系数 L 和电容 C 的关系是：

$$T=2\pi\sqrt{LC} \tag{6-34}$$

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{6-35}$$

式中 T、f、L、C 的单位分别是秒(s)、赫兹(Hz)、亨(H)、法拉(F)。

根据上述公式，选用适当的电容器和线圈，就可以使振荡电路的周期和频率符合人们的需要。要改变振荡电路的周期和频率，可以通过改变电容或电感的办法来实现。

四、LC 谐振电路

1. LC 串联谐振电路

(1)谐振频率

如图 6-46(a)所示为 LC 串联谐振电路。设信号为 u，频率为 f，当电路中的感抗 X_L 和容抗 X_C 相等，即 $2\pi fL=\dfrac{1}{2\pi fC}$ 时，则 $\phi=\arctan\dfrac{X_L-X_C}{R}=0$，此时，输入信号 u 与电流 i 同相，这时电路发生谐振现象，因为发生在串联电路中，所以称为串联谐振。

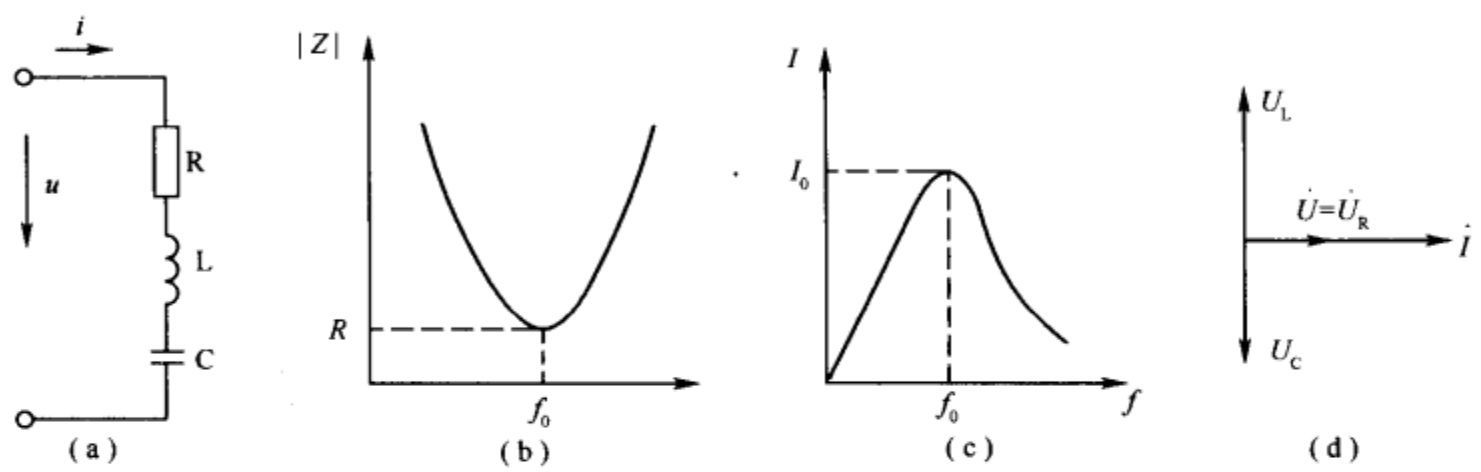


图 6-46　串联谐振电路

$2\pi fL=\dfrac{1}{2\pi fL}$ 是发生串联谐振的条件，由此可得到谐振频率为：

$$f=f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{6-36}$$

从式(6-36)可以看出，f_0 只与 L、C 大小有关，而与 R 的大小无关。L、C 大，谐振频率反而低。当送入 LC 串联谐振电路的信号频率 f 等于该电路的固有谐振频率 f_0 时，电路便发生串联谐振现象。可见，只要调节 L、C 或输入信号频率 f，都能使电路发生谐振。

(2)串联谐振主要特性

①谐振时，电路阻抗 $|Z|=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=R$。可见，阻抗值为最小，且为纯电阻性，如图 6-46(b)所示曲线，在 f_0 处的阻抗达最小，为回路中的直流电阻 R。当信号频率大于或小于 f_0 时，该电路的阻抗均大于 f_0 时的阻抗。信号频率愈是偏离 f_0，电路的阻抗愈大。

②因为谐振时阻抗值最小，因此，在信号电压不变的情况下，电路中的电流将在谐振时达到最大值，如图 6-46(c)所示。

③谐振时，由于感抗 X_L 和容抗 X_C 相等，所以，L 上的电压等于 C 上的电压，但方向相反(L 上的电压超前电流 90°，C 上的电压落后电流 90°)，因此，信号电压与 R 上的电压和方向一致，如图 6-46(d)所示。

④当 $X_L=X_C>R$ 时，L、C 上的电压都将高于信号电压。如果电压过高时，可能会击穿线圈和电容器的绝缘，因此，电力工程上一般应避免发生串联谐振，但在无线电工程上，则常利用串联谐振以获得较高电压，电容或电感元件上的电压常高于信号电压的几十倍

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

或几百倍。由于串联谐振时 L、C 上的电压可能超过信号电压的许多倍，所以串联谐振也称为电压谐振。

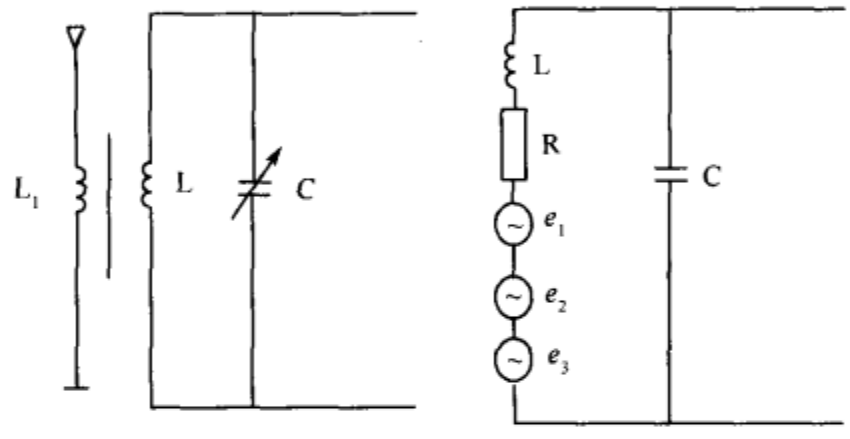
L 或 C 上的电压与信号电压的比值通常用 Q 来表示：

$$Q=\frac{U_C}{U}=\frac{U_L}{U}=\frac{1}{\omega_0 CR}=\frac{\omega_0 L}{R} \tag{6-37}$$

Q 称为电路的品质因数，简称 Q 值。它的意义表示在谐振时电容或电感元件上的电压是信号电压的 Q 倍，例如，若 $Q=100$，$U=6\text{mV}$，那么在谐振时，电容或电感元件上的电压就可达 600mV。

(3)串联谐振的应用

串联谐振在无线电工程上的应用较多，例如在接收机里被用来选择信号。图 6-47(a)是接收机里典型的输入电路。它的作用是将需要收听的信号从天线所收到的许多频率不同的信号中选出来，其他不需要的信号则尽量加以抑制。



(a)　　(b)

图 6-47　调谐回路及其等效电路

输入电路的主要部分是天线线圈 L_1 和由电感线圈 L 与可变电容器 C 所组成的串联谐振电路。天线所收到的各种频率不同的信号都会在 LC 谐振电路中感应出电动势 e_1、e_2、e_3 等，如图 6-47(b)所示，图中的 R 是线圈 L 的电阻。改变 C，将所需信号频率调到串联谐振，那么这时 LC 回路中该频率的电流最大，在可变电容器两端的这种频率的电压也就最高。其他各种不同频率的信号虽然也在接收机里出现，但由于它们没有达到谐振，在回路中引起的电流很小。这样就起到了选择信号和抑制干扰的作用。

这里有一个选择性的问题。如图 6-48(a)所示，当谐振曲线比较尖锐时，稍有偏离谐振频率 f_0 的信号就大大减弱。就是说，谐振曲线越尖锐，选择性就越强。为了定量地说明选择性的好坏，通常引用通频带宽度的概念。它规定：在电流 I 值等于最大值 I_0 的 70.7%(即$\frac{1}{\sqrt{2}}$)处频率的上下限之间宽度称为通频带宽度。即通频带宽度越小，表明谐振曲线越尖锐，电路的频率选择性就越强。而谐振曲线的尖锐或平坦同 Q 值有关，如图 6-48(b)所示。设电路的 L 和 C 值不变，只改变 R 值，R 值越小，Q 值越大($Q=\frac{1}{\omega_0 CR}=\frac{\omega_0 L}{R}$)，则谐振曲线越尖锐，也就是选择性越强。这是品质因数 Q 的另外一个物理意义。减小 R 值，也就是减小线圈导线的电阻和电路中的各种能量损耗。

例 12：某收音机的调谐电路如图 6-47 所示，设线圈的等效电感 $L=0.3\text{mH}$，电阻

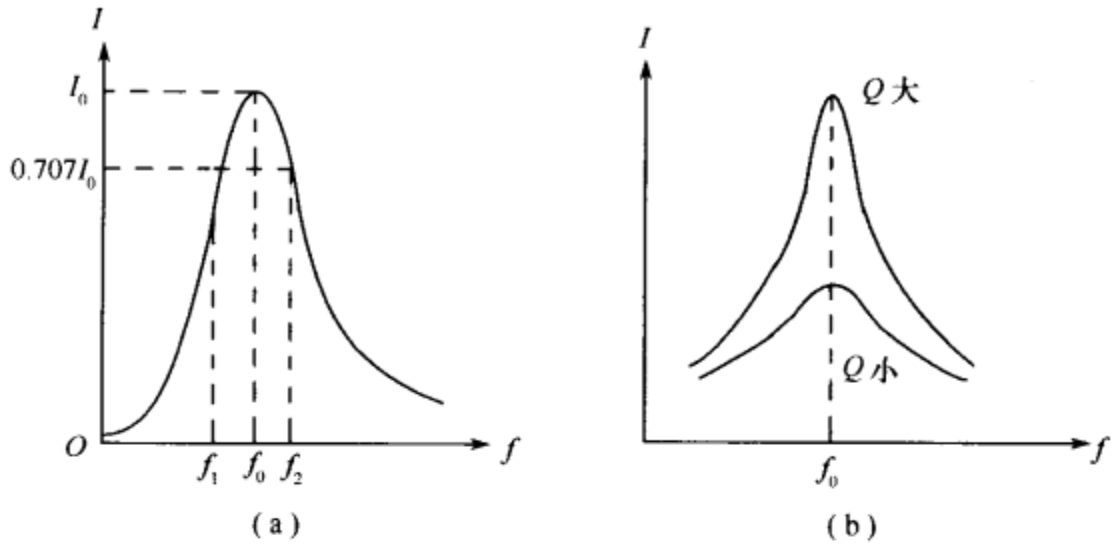


图 6-48　通频带和 Q 值谐振曲线

(a)通频带宽度；(b)Q 与谐振曲线的关系。

$R=16\Omega$，欲收听 640kHz 的广播节目，应将电容值 C 调至多少？此时 Q 值是多少？如果该频率的感应电压 $U=2\mu V$，问这时电容两端电压是多少？信号电流有多大？

解：由于 $f=f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

$$640\times10^3=\frac{1}{2\times3.14\times\sqrt{0.3\times10^{-3}\times C}}$$

所以，$C=204pF(1pF=10^{-12}F)$

$$Q=\frac{X_L}{R}=\frac{2\pi f_0 L}{R}=\frac{2\times3.14\times640\times10^3\times0.3\times10^{-3}}{16}=75$$

所以谐振时电容两端电压：

$$U_C=QC=75\times2\times10^{-6}=150(\mu V)$$

谐振时的电流：

$$I_0=\frac{U}{R}=\frac{2\times10^{-6}}{16}=0.13(\mu A)$$

2. LC 并联谐振电路

图 6-49(a)是 LC 并联谐振电路，其中 R 是 L 的直流电阻。

(1)谐振频率

LC 并联谐振电路的谐振频率 f_0 由式(6-38)决定：

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{6-38}$$

从式 6-38 可以看出，LC 并联谐振电路的谐振频率与 R 无关，只与 L、C 有关。当信号频率等于该电路的固有谐振频率时，该 LC 电路发生并联谐振现象。

(2)LC 并联谐振主要特性

①并联谐振时，电路的阻抗达到最大，并为纯阻性，阻抗大小为 $|Z|=\dfrac{L}{RC}$，如图6-49(b)所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

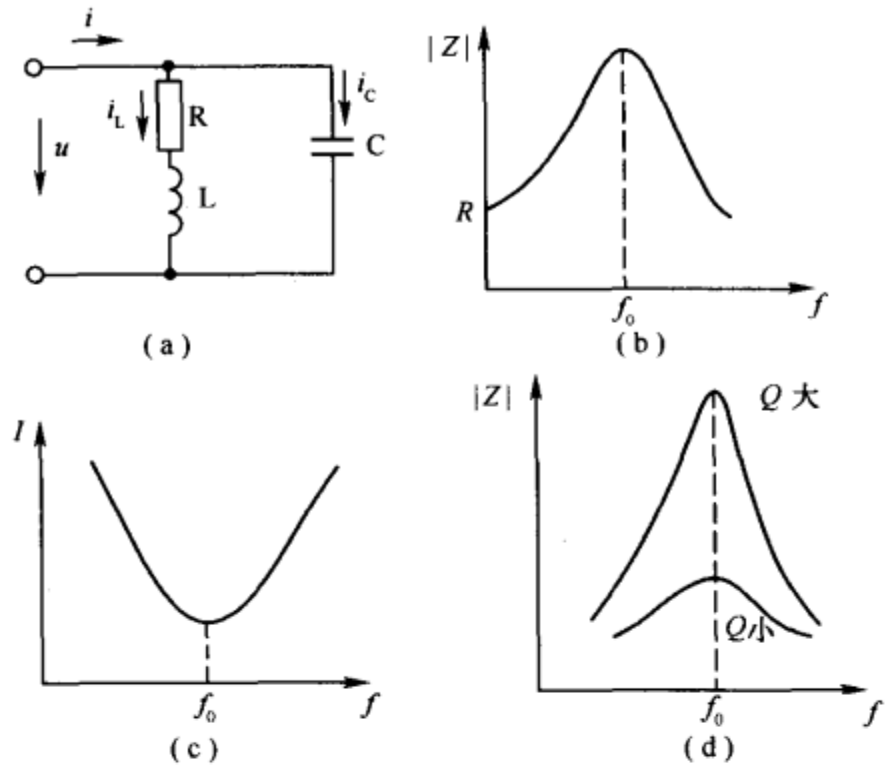


图 6-49　LC 并联谐振电路

②并联谐振时，在信号电压一定时，电路中的电流 I 达到最小值 ，如图 6-49(c)所示。

③并联谐振回路也引入了品质因数 Q，且与串联回路的 Q 值一样，$Q=\frac{\omega_0 L}{R}=\frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$。

④并联谐振时，回路总电流很小，而电容、电感支路的电流达到最大值，为回路总电流的 Q 倍，但电容、电感支路的电流方向相反、大小相差不多，其差值为回路的总电流。由于并联谐振电容、电感支路中的电流达到最大值，所以并联谐振又称电流谐振。

⑤不同的 Q 值有不同的曲线，Q 值大的曲线尖锐。在谐振频率 f_0 处，电路阻抗为最大。当信号频率 f 高于或低于 f_0 时，电路的阻值均下降，且信号频率 f 偏差 f_0 愈多，电路阻抗愈小，如图 6-49(d)所示。

并联谐振在无线电工程和工业技术中得到了广泛的应用，例如，利用并联谐振时阻抗高的特点可以选择信号或消除干扰。

五、陷波器

陷波器又称吸收电路，广义上讲它也是一种滤波器，其作用是阻断规定的频带内信号，而在此频带之外，信号能够顺利通过。

1. LC 串联谐振式吸收电路

图 6-50 是 LC 串联谐振式吸收电路。及其输出信号特性曲线。从特性曲线可以看出，在 f_0 处的输出信号很小，这样将输入信号中的 f_0 这一频率信号吸收掉。

这一电路的工作原理是：LC 串联谐振电路在谐振时其阻抗为最小，设谐振频率为 f_0，这样输入信号中的 f_0 频率信号被这一 LC 串联谐振电路分流到地。对于远高于或低于 f_0 的信号，由于 LC 电路失谐，电路的阻抗很大而不能对地分流，这样便达到了只吸收以 f_0 为中心频率很小频带内的信号。

2. LC 并联谐振式吸收电路

图 6-51 所示是 LC 并联谐振式吸收电路及其输出信号特性曲线。

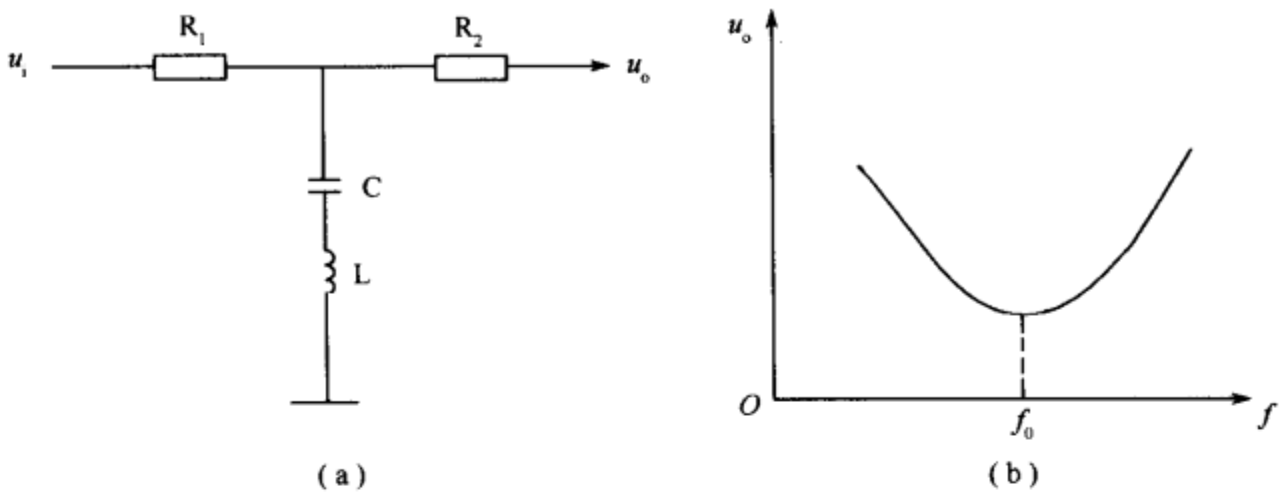


图 6-50　LC 串联谐振式吸收电路

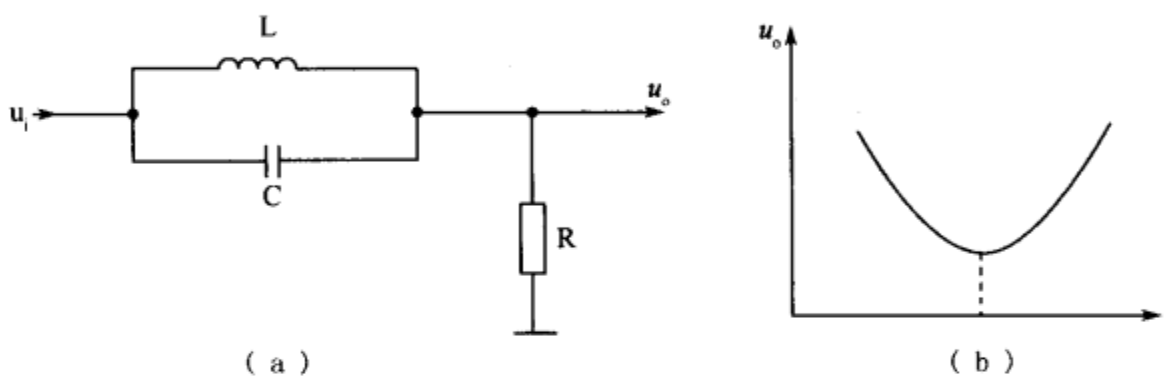


图 6-51　LC 并联谐振式吸收电路

这一电路的工作原理是：由于 LC 并联谐振电路的阻抗$|Z|$为最大，$|Z|$与 R 构成分压电路，从图中可以看出，输出信号 $u_o=\dfrac{R}{R+|Z|}u_i$，可见，在谐振频率 f_0 处，由于$|Z|$最大，所以输出信号 u_o 最小，即输入信号衰减最大。对于输入信号中频率远高于或低于 LC 谐振频率 f_0 的信号，因 LC 并联谐振电路失谐，阻抗$|Z|$很小，因此，$u_o\approx u_i$。

3. 桥 T 式吸收电路

图 6-52 是桥 T 式吸收电路。其中图(a)是吸收电路，图(b)是该吸收电路的等效电路图，图(c)是它的输出信号特性曲线。

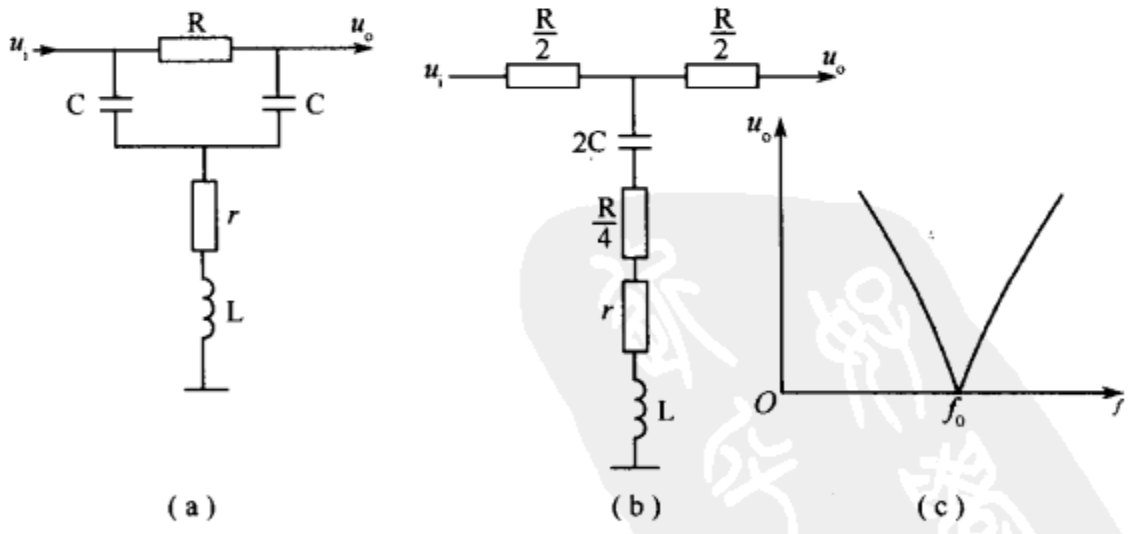


图 6-52　桥 T 式吸收电路

图(a)所示电路是一个由 R 和 C 构成的三角形电路，通过三角形—星形变换，可转换成图(b)所示的等效电路。这一吸收电路的谐振频率 f_0 由下式决定：

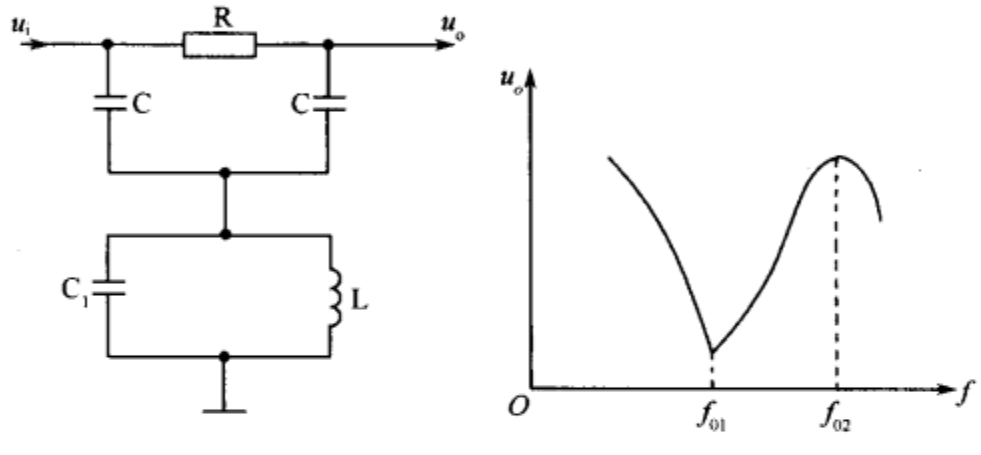
标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{L(2C)}}$$

图(b)所示电路中，$-\frac{R}{4}$为负电阻，当 $r=\frac{R}{4}$时，该谐振回路谐振时的总电阻为零，故对 f_0信号的吸收很强，理论上是将 f_0信号全部吸收。

4. 并联桥 T 式吸收电路

图 6-53 所示是并联桥 T 式吸收电路。图(a)是吸收电路，(b)是它的输出信号特性曲线。这种并联桥 T 式吸收电路是在桥 T 式吸收电路的基础上，在 L 上并联一只电容器 C_1构成一个 LC 并联谐振电路，其谐振频率为 f_{02}。当信号频率低于谐振频率 f_{02}时，LC 并联谐振电路失谐，此时该电路呈现感性，等效成一个电感 L′。这样，L′与 R 和两个 C 构成桥 T 式吸收电路，其吸收频率为 f_{01}，$f_{01}<f_{02}$。由此可知，这种并联桥 T 式吸收电路对 f_{01}信号是吸收的，而对 f_{02}信号则是起提升作用的。



(a)　　(b)

图 6-53　并联桥 T 式吸收电路

六、RC 移相电路

有些电路，要求输出信号相位滞后或超前输入信号一个角度，这可以通过移相电路来实现。下面简要介绍几种常用的移相电路。

1. RC 移相电路

RC 移相电路中主要是电阻 R 和电容 C 两个元件。对于电阻 R 而言，流过 R 的电流与电阻两端的电压是同相位的，对于电容器 C 而言，流过 C 的电流超前电压 90°。在 RC 移相电路中，就是利用电容器的这一特性来实现信号的移相。

(1)超前移相电路

图 6-54(a)是 RC 超前移相电路。电路中，u_i 为输入信号电压，u_o 为输出信号电压，即电阻 R 两端的电压。这一电路具有使 u_o 信号相位超前 u_i 的作用，故称为超前移相电路。

分析 RC 移相电路一般采用向量图，画向量图时，可按以下步骤进行：

① 先画一条水平线，代表输入信号电流向量$\dot{I}$。

② 画出输出电压的向量$\dot{U}_o$。由于输出电压向量$\dot{U}_o$取自电阻 R 两端，而电阻 R 两端电压与流过电阻的电流同相位，所以向量$\dot{U}_o$与$\dot{I}$同相。

③ 画出电容器 C 两端的电压向量$\dot{U}_C$，由于$\dot{U}_C$ 滞后于流过 C 的电流$\dot{I}$90°，所以向量

$\dot{U}_C$ 与向量 $\dot{I}$ 垂直，且方向向下。

④ 画出输入电压向量 $\dot{U}_i$。以 $\dot{U}_o(\dot{U}_R)$ 和 $\dot{U}_C$ 为两边画一个平行四边形，其对角线的长度和指向即代表输入电压向量 $\dot{U}_i$。最后得到如图 6-54(b)所示的向量图。

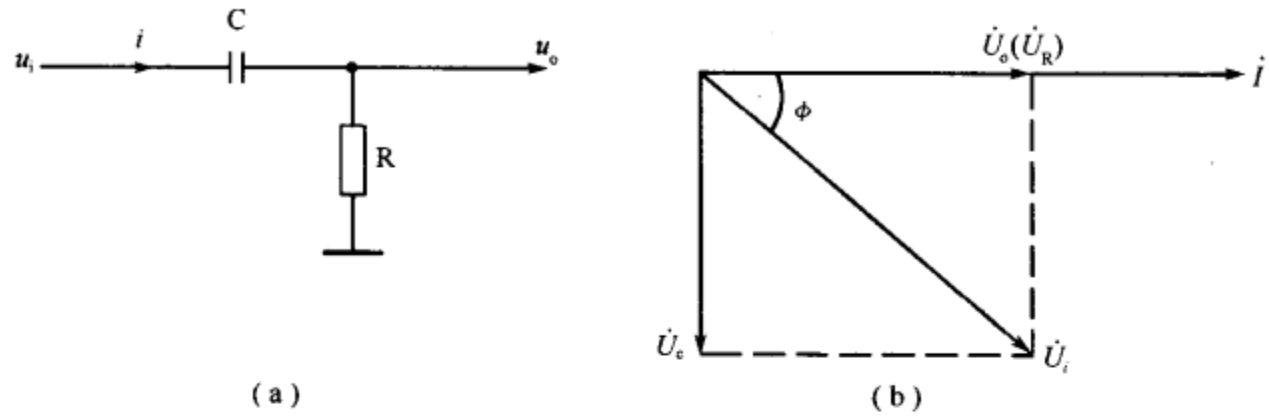


图 6-54　超前移相电路

从向量图中可以清楚地看出，$\dot{U}_C$ 与 $\dot{U}_i$ 的夹角为 ϕ，并且 $\dot{U}_o$ 超前 $\dot{U}_i$，即 $\dot{U}_o$ 超前 $\dot{U}_i\phi$ 角。这说明，输入信号加入这一电路后，其输出信号被超前移相了 ϕ，所以这是一个超前移相电路。从图中的向量图中还可以看出，改变 $\dot{U}_R$ 或 $\dot{U}_C$ 的大小，即可改变移相角 ϕ，只要适当选取 R、C 值，便能获得 90°范围内所需要的相位超前量。

(2)滞后移相电路

图 6-55(a)是 RC 滞后移相电路。这一电路与 RC 超前移相电路的主要不同之处是 R、C 的位置互换了，其输出电压 u_o 取自电容器 C 上的电压 u_c。

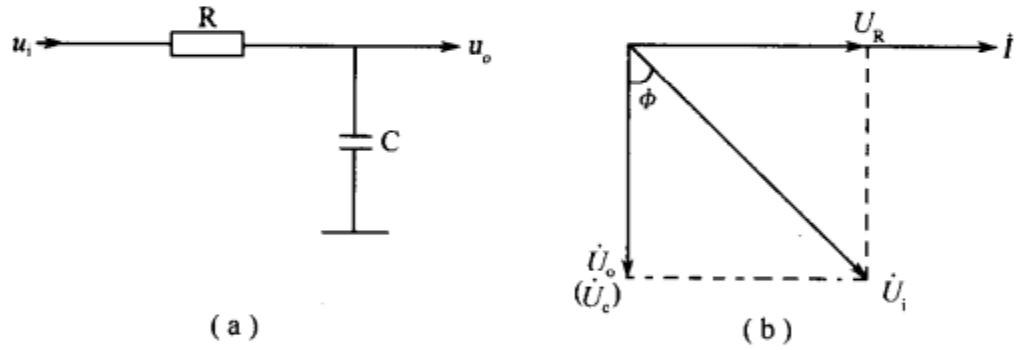


图 6-55　滞后移相电路

电路中，u_i 为输入信号电压，u_o 为输出信号电压，即电容器 C 两端的电压。这一电路具有使 u_o 信号相位滞后 u_i 的作用，故称为滞后移相电路。

画向量图时，可按以下步骤进行：

① 先画一条水平线，代表输入信号电流向量 $\dot{I}$。

② 画出输出电压的向量 $\dot{U}_o$。由于输出电压向量 $\dot{U}_o$ 取自电容器 C 两端，而电容器 C 上的电压向量 $\dot{U}_C$ 滞后于 $\dot{I}$ 90°，所以输出电压向量 $\dot{U}_o(\dot{U}_C)$ 与向量 $\dot{I}$ 垂直，且方向向下。

③ 画出电阻 R 两端的电压向量 $\dot{U}_R$，而电阻 R 上的电压降与流过电阻的电流同相位，所以向量 $\dot{U}_R$ 与 $\dot{I}$ 同相。

④ 画出输入电压向量 $\dot{U}_i$。以 $\dot{U}_R$ 和 $\dot{U}_o(\dot{U}_C)$ 为两边画一个平行四边形，其对角线的长度和指向即代表输入电压向量 $\dot{U}_i$。最后得到如图 6-55(b)所示的向量图。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

从向量图中可以清楚地看出，$\dot{U}_o$ 与 $\dot{U}_i$ 的夹角为 ϕ，并且 $\dot{U}_o$ 滞后 $\dot{U}_i$，即 $\dot{U}_o$ 滞后 $\dot{U}_i\phi$ 角。这说明，输入信号加入这一电路后，其输出信号被滞后移相了 ϕ，所以这是一个滞后移相电路。从图中的向量图中还可以看出，改变 $\dot{U}_R$ 或 $\dot{U}_C$ 的大小，即可改变移相角 ϕ，只要适当选取 R、C 值，便能获得 90°范围内所需要的相位滞后量。

2. RL 移相电路

(1)RL 超前移相电路

图 6-56(a)是 RL 超前移相电路。电感 L 的特性是电压超前电流 90°，恰好与电容的特性相反。电路中，u_i 为输入信号电压，u_o 为输出信号电压，取自电感 L 两端。

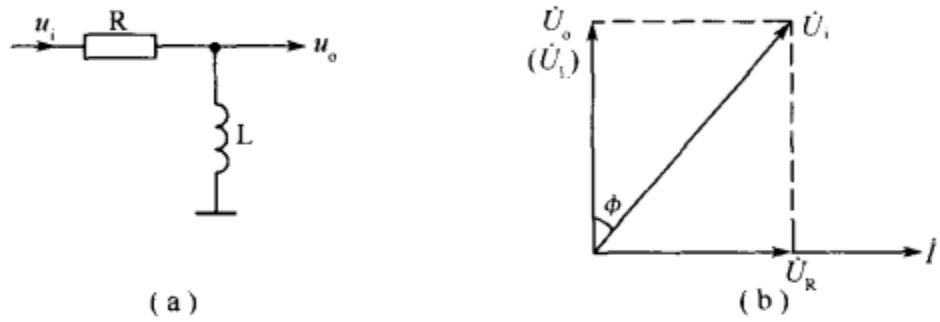


图 6-56　RL 超前移相电路

画向量图时，可按以下步骤进行：

①先画一条水平线，代表输入信号电流向量 $\dot{I}$。

②画出输出电压的向量 $\dot{U}_o$。由于输出电压向量 $\dot{U}_o$ 取自电感 L 两端，而电感 L 上的电压向量 $\dot{U}_L$ 超前于 $\dot{I}$ 90°，所以输出电压向量 $\dot{U}_o(\dot{U}_L)$ 与向量 $\dot{I}$ 垂直，且方向向上。

③ 画出电阻 R 两端的电压向量 $\dot{U}_R$，而电阻 R 上的电压降与流过电阻的电流同相位，所以向量 $\dot{U}_R$ 与 $\dot{I}$ 同相。

④ 画出输入电压向量 $\dot{U}_i$。以 $\dot{U}_R$ 和 $\dot{U}_o(\dot{U}_L)$ 为两边画一个平行四边形，其对角线的长度和指向即代表输入电压向量 $\dot{U}_i$。最后得到如图 6-56(b)所示的向量图。

从向量图中可以看出，$\dot{U}_o$ 超前 $\dot{U}_i\phi$ 角。改变 $\dot{U}_R$ 或 $\dot{U}_L$ 的大小，即可改变移相角 ϕ，只要适当选取 R、L 值，便能获得 90°范围内所需要的相位超前量。

(2)RL 滞后移相电路

图 6-57(a)是 RL 滞后移相电路。输出电压 u_o 取自于电阻 R 两端，而不像超前移相电路中的取自于电感 L 两端。

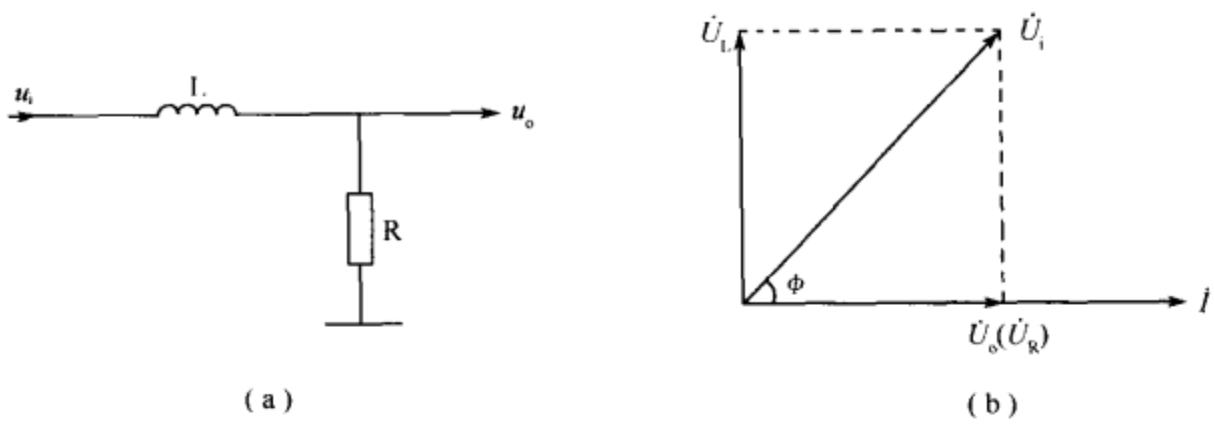
根据前述方法作出向量图，如图 6-57(b)所示，从向量图中可以看出，输出信号 u_o 滞后于输入信号 u_i 一个角度 ϕ，这一电路的最大滞后相移量为 90°。

3. LC 谐振电路移相电路

(1)LC 并联谐振移相电路

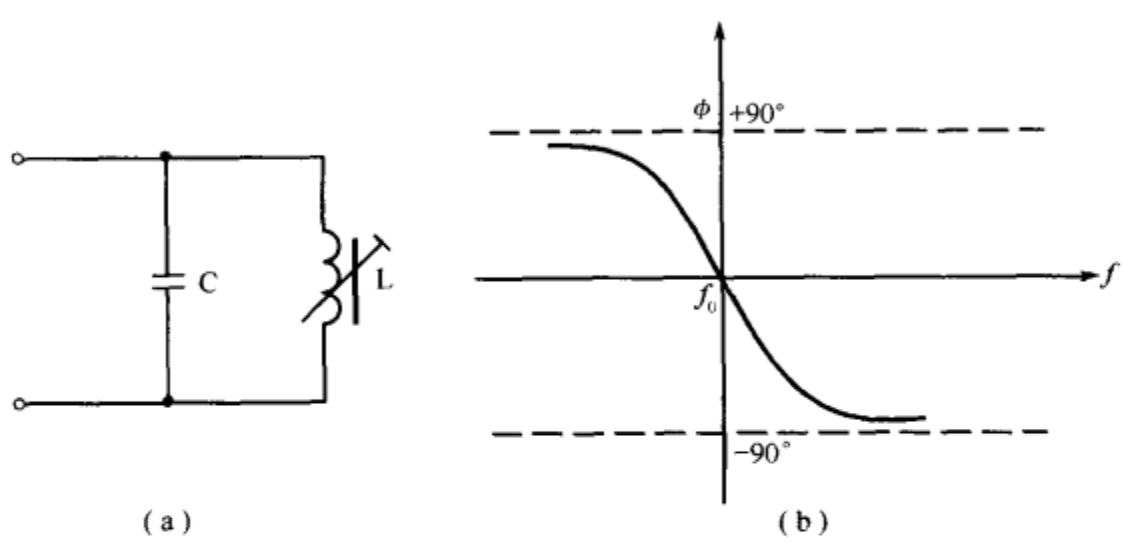
图 6-58 是 LC 并联谐振移相电路。图(a)中，L 和 C 构成 LC 并联谐振电路，其中 L 的电感可以微调，该电路的谐振频率为 f_0。图(b)是 LC 并联谐振电路的相频特性曲线。

当输入信号频率等于谐振频率 f_0 时，其输出信号相移量为 0；当输入信号频率高于谐振频率 f_0 时，相移量 ϕ 为负值。输入信号频率越大于 f_0，相移量越大，最大为−90°。ϕ 为负值表示是滞后相移。当输入信号频率低于谐振频率 f_0 时，相移 ϕ 为正值，输入信号



(a)　　(b)

图 6-57　RL 滞后移相电路



(a)　　(b)

图 6-58　LC 并联谐振移相电路

频率越低于 f_0，相移量越大，最大为+90°。ϕ 为正值表示是超前相移。可见，这种移相电路不仅可以实现超前移相，也可以进行滞后移相，其移相范围为−90°～+90°。

这一电路进行移相的原理是：假设输入信号频率为 f_i，若要对 f_i 信号进滞后移相，只要调整 L 的电感，使 L、C 这一并联谐振电路的谐振频率 $f_0<f_i$，便能实现对 f_i 的滞后移相。f_i 越是大于 f_0，滞后相移量越大，只要适当调节 L 的电感，便能获得所需要的小于 90°的滞后相移量。

反之，若要求对输入信号 f_i 进行超前移相，只要调整 L 的电感，使 L、C 的谐振频率 f_0 大于 f_i 即可。调节 L 的电感大小可得到需要的超前相移量。

重点提示：对于 LC 并联谐振电路，当输入信号频率 f_i 等于该谐振频率 f_0 时，谐振电路呈纯阻性。当 $f_i>f_0$ 时，该电路呈容性。当 $f_i<f_0$ 时，该电路呈感性。

(2)LC 串联谐振移相电路

图 6-59 为串联谐振移相电路，与上述并联谐振移相电路不同之处在于：当输入信号频率 $f_i>f_0$ 时，是超前相移而不是滞后相移；当 $f_i<f_0$ 时，是滞后相移而不是超前相移。只要调整 L 的电感，改变 L、C 串联谐振电路的谐振频率 f_0 大小，便可获得在−90°～+90°范围的移相。

重点提示：对于 LC 串联谐振电路，当输入信号频率 f_i 等于该电路谐振频率 f_0 时，该电路呈纯阻性。当 $f_i>f_0$ 时，该电路呈感性。当 $f_i<f_0$ 时，该电路呈容性。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

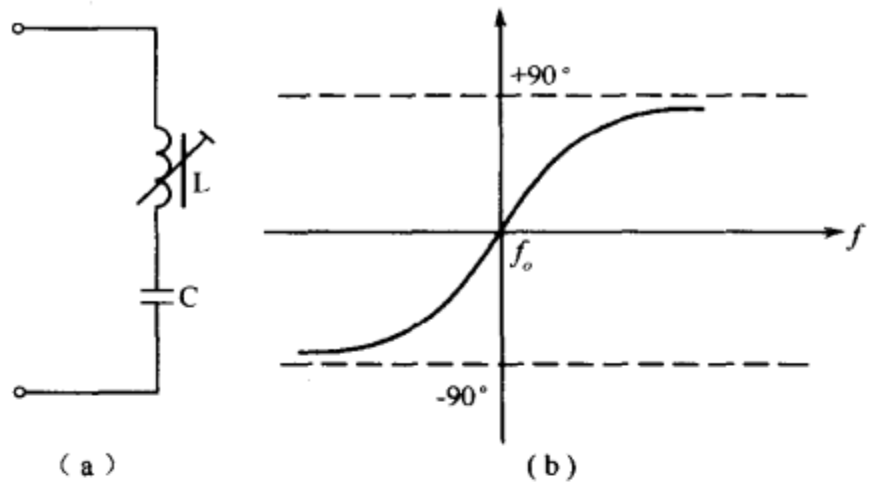


图 6-59　LC 串联谐振移相电路

阅读材料：趋肤效应

交流电通过导体时，各部分的电流密度不均匀，导体内部电流密度小，导体表面电流密度大，这种现象称为趋肤效应。产生趋肤效应的原因是由于感抗的作用，导体内部比表面具有更大的电感 L，因此对交流电的阻碍作用大，使得电流密集于导体表面。趋肤效应使得导体的有效横截面减小，因而导体对交流电的有效电阻比对直流电的电阻大。

交流电的频率越高，趋肤效应越显著，频率高到一定程度，可以认为电流完全从导体表面流过。因此，在高频交流电路中，必须考虑趋肤效应的影响，例如收音机磁性天线上的线圈用多股互相绝缘的导线绕制，电视室外天线不用金属棒而用直径较粗的金属管制作，都是为了增加导体的表面积，克服趋肤效应带来的不利影响。

第七节　叠加法在交流电路中的应用

在电子电路中，常常会遇到这样的情况，即电路中不但有交流电压，而且还含有直流成分，对于这种情况，可采用叠加法进行分析。即分别计算直流分量和交流分量单独存在时，电路某支路中产生的电流作用，而后再把它们加起来。下面举例分析。

例 13： 如图 6-60(a)所示 RC 电路，输入电压 u_1 中含有 240V 的直流成分和 100Hz 的正弦交流成分，交流成分的有效值为 100V，已知 $R=200\Omega$，$C=50\mu F$。求输出电压 u_2 含有的直流成分和交流成分各是多少？

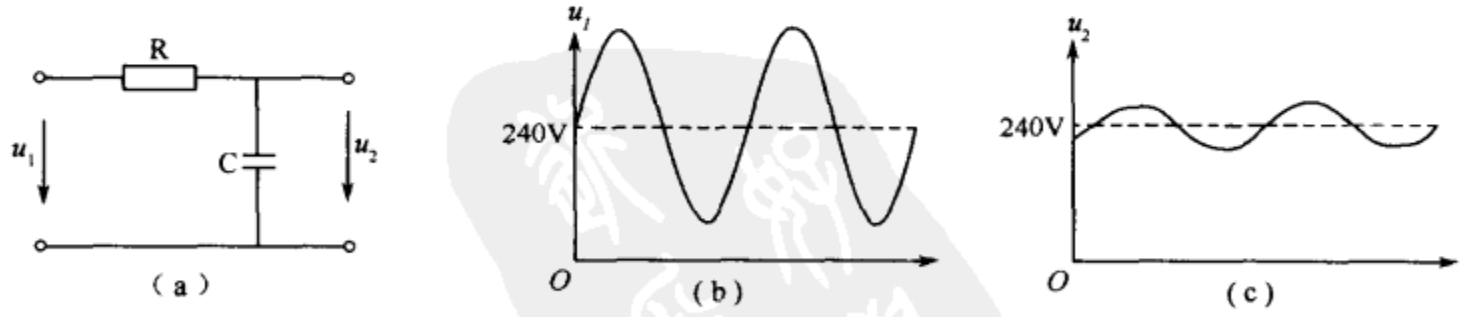


图 6-60　例 13 图

解：因为电路不通直流，240V 直流电压全加在电容器两端，所以，输出电压的直流电压就是 240V。

对于 100Hz、100V 的交流电：

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\times 3.14\times 100\times 50\times 10^{-6}}=32(\Omega)$$

$$|Z|=\sqrt{R^2+X_C^2}=\sqrt{200^2+32^2}=202(\Omega)$$

所以交流输出有效值为：

$$U_2=\frac{U_1}{|Z|}X_C=\frac{100\times 32}{202}=16(\mathrm{V})$$

可见，输出电压的交流成分大为减小，如图 6-60(b)、(c)所示。因此，这是一个滤波电路。

例 14：有一 RC 并联电路，如图 6-61 所示，已知 $R=1\mathrm{k}\Omega$，$C=50\mu\mathrm{F}$，$i=1.5+0.707\sqrt{2}\sin 6280t$（mA），求各支路中的电流和两端电压。

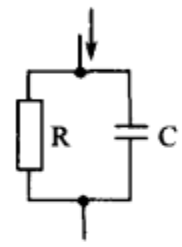


图 6-61　例 14 图

解：用叠加法进行计算，如图 6-62 所示。

① $I_0=1.5\mathrm{mA}$

因为电容器 C 有隔直作用，所以，电流 i 的直流分量 I_0 只能通过

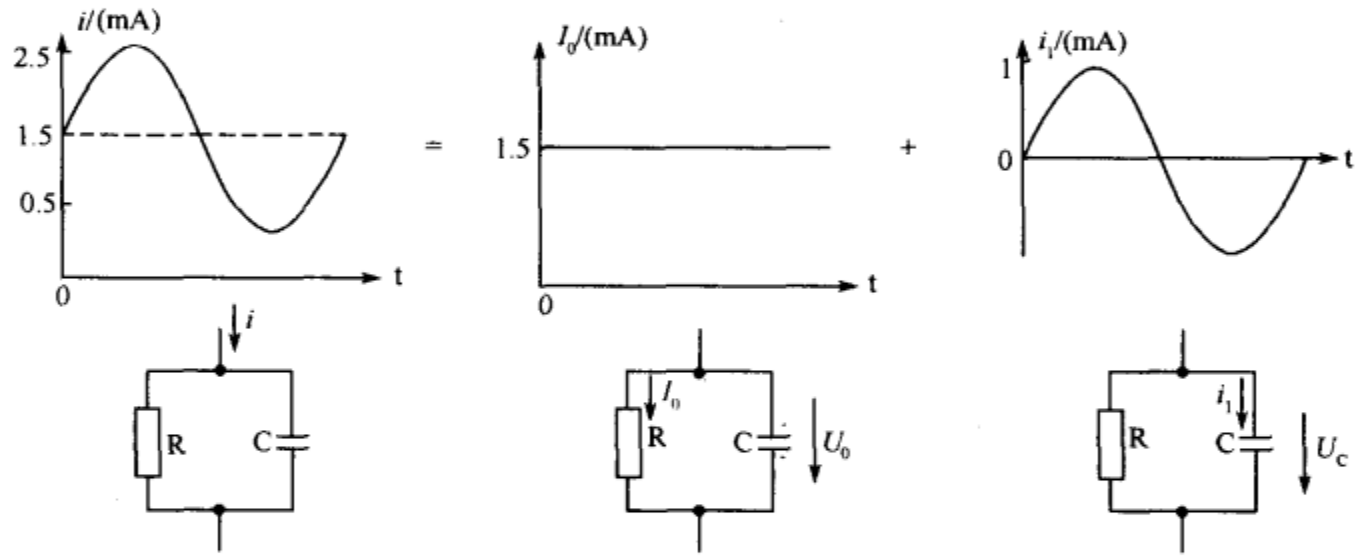


图 6-62　叠加法

电阻 R，在 R 上产生直流压降，$U_0=I_0R=1.5\times 10^{-3}\times 1\times 10^3=1.5(\mathrm{V})$，此时，电容器 C 也充电到 1.5V。

② $i_1=0.707\sqrt{2}\sin 6280t(\mathrm{mA})$

电流 $i_1=1.5+0.707\sqrt{2}\sin 6280t$ 的正弦交流分量 $i_1=0.707\sqrt{2}\sin 6280t$ 的幅值为 $I_{1m}=0.707\sqrt{2}=1(\mathrm{mA})$，频率 $f_1=\frac{6280}{2\pi}=1000(\mathrm{Hz})$。

电容器 C 的容抗为：

$$X_C=\frac{1}{2\pi f_1C}=\frac{1}{6280\times 50\times 10^{-6}}\approx 3(\Omega)$$

因为 $X_C\ll R$，所以，交流分量 $i_1=0.707\sqrt{2}\sin 6280t$ 有捷径可通，基本上不通过 R 这条支路，在电容器 C 上产生的交流压降幅值为：

$$U_{cm}=I_{1m}X_C=1\times 10^{-3}\times 3=0.003(\mathrm{V})$$

$U_{cm}\ll U_0$，U_{cm} 可以忽略不计。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

因此，与 R 并联的电容器 C，并且 $X_C \ll R$，对交流就起到了旁路作用，而产生的交流压降又小到可以忽略不计，这样，C 就保证了 R 两端的电压基本上恒定。

如果除去电容器 C，那么，在电阻 R 两端不仅有 1.5V 的直流压降，同时，还会有幅值为 $1\times10^{-3}\times1\times10^{3}=1$(V)的交流压降。

＊第八节　复数在交流电路中的应用

一、复数

1. 复数的表示形式

复数有多种表示形式，其代数表示形式为：

$$A=a+\mathrm{j}b \tag{6-39}$$

式中：a 和 b 分别是复数的实部和虚部，j 是虚数单位，即数学中的虚数 i，电路基础中为避免与电流 i 相混而改用 j 表示。算符号符 $\mathrm{j}=\sqrt{-1}$。

复数还可以用复平面内有向线段来表示，如图 6-63 所示。图中横坐标为实数轴，用＋1 表示实单位；纵坐标为虚数轴，用＋j 表示虚单位。实数轴与虚数轴构成的平面称为复平面。复数 $A=a+\mathrm{j}b$ 是横坐标为 a 和纵坐标为 b 的一点。a 是复数的实数部分，简称实部，它等于复数 A 在实轴上的投影；b 是复数的虚数部分，简称虚部，它等于复数 A 在虚轴上的投影。复平面上矢量 $\boldsymbol{OA}$ 的长度用 r 表示，称为复数的模，矢量与实轴正方向的夹角 ϕ，称为复数的辐角。

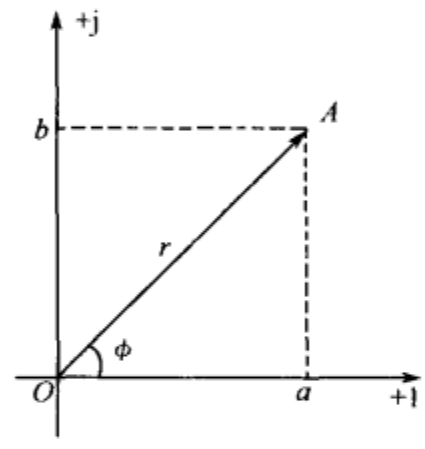


图 6-63　有向线段的复数形式

从图(6-63)中可以看出，实部、虚部、模和辐角之间的关系为：

$$\begin{cases} a=r\cos\phi \\ b=r\sin\phi \end{cases} \tag{6-40}$$

$$\begin{cases} r=\sqrt{a^2+b^2} \\ \phi=\arctan\dfrac{b}{a} \end{cases} \tag{6-41}$$

根据式(6-39)、式(6-40)，可把复数 $A=a+\mathrm{j}b$ 改写为复数的三角形式：

$$A=r\cos\phi+j r\sin\phi \tag{6-42}$$

根据欧拉公式：$\cos\phi=\dfrac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi}+\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\phi}}{2}$ 和 $\sin\phi=\dfrac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi}-\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\phi}}{2\mathrm{j}}$ 可得复数的指数形式：

$$A=r\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi} \tag{6-43}$$

为便于书写，指数形式又可变为极坐标形式，即

$$A=r\angle\phi \tag{6-44}$$

综上所述，复数的几种表示形式为

$$A=a+\mathrm{j}b=r\cos\phi+\mathrm{j}r\sin\phi=re^{\mathrm{j}\phi}=f\angle\phi$$

不论复数是哪种表达式，它都只有两个要素，即模和辐角(或是虚部和实部)。只要它们一定，其对应的复数便确定了。

2. 复数的四则运算

(1)复数的加减运算

复数相加或相减时,一般采用复数的代数形式,即实部与实部相加减,虚部与虚部相加减。例如,设 $A_1=a_1+\mathrm{j}b_1$,$A_2=a_2+\mathrm{j}b_2$,则

$$A_1\pm A_2=(a_1\pm a_2)+\mathrm{j}(b_1\pm b_2) \tag{6-45}$$

(2)复数的乘除运算

复数的乘除运算一般采用指数形式或极坐标形式。两复数相乘时,其模相乘,辐角相加;两复数相除时,其模相除,辐角相减。例如,设 $A_1=r_1\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi_1}=r_1\angle\phi_1$,$A_2=r_2\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi_2}=r_2\angle\phi_2$。则:

$$A_1A_2=r_1r_2\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\phi_1+\phi_2)}=r_1r_2\angle(\phi_1+\phi_2) \tag{6-46}$$

$$\frac{A_1}{A_2}=\frac{r_1}{r_2}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\phi_1+\phi_2)}=\frac{r_1}{r_2}\angle(\phi_1-\phi_2) \tag{6-47}$$

3. 符号 j 的意义

在电路计算中,常遇到算符 j 的乘方运算,因为 $\mathrm{j}=\sqrt{-1}$,所以 $\mathrm{j}^2=-1$,$\mathrm{j}^3=-\mathrm{j}$,$\mathrm{j}^4=\mathrm{j}$,$\frac{1}{\mathrm{j}}=\frac{\mathrm{j}}{\mathrm{j}^2}=-\mathrm{j}$。

根据欧拉公式可知:$\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{\pi}{2}}=\cos\frac{\pi}{2}+\mathrm{j}\sin\frac{\pi}{2}=+\mathrm{j}$,可见,$\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{\pi}{2}}$ 即为算符 +j 复数形式。同理可得:$\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{\pi}{2}}$ 即为算符 −j 的复数形式。

如果把复数 $A=r\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi}$ 乘以 $\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{\pi}{2}}$,可得:$r\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{\pi}{2}}=r\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\phi+\frac{\pi}{2})}=\mathrm{j}r\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi}$;如果把复数 $A=r\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi}$ 乘以 $\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{\pi}{2}}$,可得:$r\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{\pi}{2}}=r\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\phi-\frac{\pi}{2})}=-\mathrm{j}r\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi}$。因此,一个复数 A 乘以 +j,等于该复数对应的矢量在复平面上从原矢量位置逆时针转过 $\frac{\pi}{2}$ 角度。同理,一个复数乘以 −j,等于该复数对应的矢量在复平面上从原矢量位置顺时针转过 $\frac{\pi}{2}$ 角度。因此,j 一般也称为旋转 90°的转子,如图 6-64 所示。

二、正弦量的复数表示法

一个正弦量是由它的幅值(或有效值)、频率和初相位三要素决定的。在正弦交流电路中,由于电压和电流均是同频率的正弦量,因此要确定电压或电流,只要知道它们的幅值(或有效值)和初相位两个量就行了。而一个复数恰好能满足代表两个要素的要求。

例如,设电流 i 的瞬时表达式为 $i=I_\mathrm{m}\sin(\omega t+\phi)=\sqrt{2}I\sin(\omega t+\phi)$,把电流有效值向量 $\dot{I}$ 置于复平面上(如图 6-65 所示),可得到正弦量的复数表示形式:

$$\dot{I}=a+\mathrm{j}b=I(\cos\phi+\mathrm{j}\sin\phi)=I\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi}=L\angle\phi$$

显然,$\dot{I}$ 是复数,其模等于正弦量的有效值 I,辐角等于正弦量的初相角 ϕ,我们称这个复数为有效值向量。同理,称 $\dot{I}_\mathrm{m}$ 为电流最大值向量,它也是一个复数。需要说明的是,为了和一般的复数相区别,表示正弦量的复数一般在复数上加上“·”。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

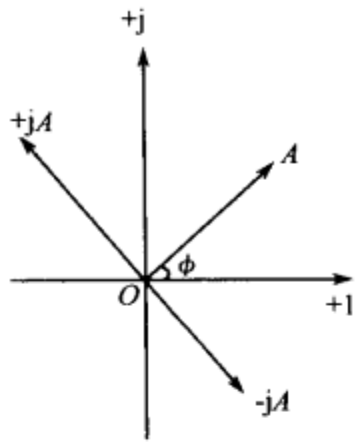


图 6-64　复数 A 乘以 j 或－j

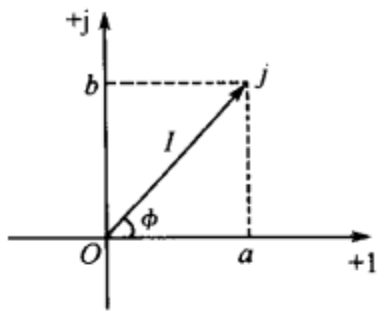


图 6-65　正弦量的复数表示

例 15：用复数形式表示 $i=150\sqrt{2}\sin(\omega t+30°)$。

解：先写出最大值向量的复数形式：

$$\dot{I}_m=150\sqrt{2}e^{j30°}$$

因此，有效值向量的复数形式为：

$$\dot{I}=150e^{j30°}$$

例 16：已知 $i_1=40\sqrt{2}\sin(314t+90°)$，$i_2=30\sqrt{2}\sin 314t$，求 i_1-i_2 的瞬时值表达式。

解法一：向量图法

画出 i_1 和 i_2 的向量 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$，如图 6-66 所示。然后，把 $\dot{I}_2$ 的向量倒转 180°变成 $-\dot{I}_2$，这时 $\dot{I}_1$ 和 $-\dot{I}_2$ 垂直。

因为　　$\dot{I}=\dot{I}_1+(-\dot{I}_2)=\dot{I}_1-\dot{I}_2$

所以，$i=i_1-i_2$ 的有效值、初相位和瞬时表达式分别为：

$$I=\sqrt{40^2+30^2}=50(A)$$

$$\phi=180°-\arctan\frac{40}{30}=126.9°$$

$$i=50\sqrt{2}\sin(314t+126.9°)$$

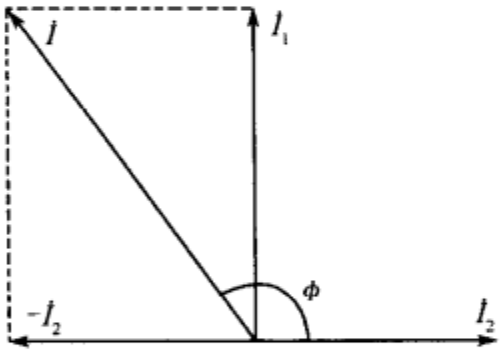


图 6-66　例 16 图

解法二：复数法

由已知条件可知：$\dot{I}_1=40\angle 90°$，$\dot{I}_2=30\angle 0°$

所以　$\dot{I}=\dot{I}_1-\dot{I}_2=40\angle 90°-30\angle 0°=$

$$(40\cos 90°+j40\sin 90°)-(30\cos 0°+30\sin 0°)=-30+j40$$

根据 $\dot{I}=-30+j40$ 可知，该向量在第二象限内，辐角为大于 90°的正角。所以

$$I=-30+j40=\sqrt{30^2+40^2}\angle\left(180°-\arctan\frac{40}{30}\right)$$

$$=50\angle 126.9°$$

因此，$i=50\sqrt{2}\sin(314t+126.9°)$

三、复数的应用

1. 纯电感和纯电容电路欧姆定律的向量复数式

(1) 纯电感电路

对于纯电感电路，如图 6-67(a) 所示。设回路电流 $i = I_m \sin\omega t$，由于纯电感电路中，电流比电压滞后 90°，所以电压 $u = U_m \sin(\omega t + 90°)$，式中 $U_m = I_m \omega L$，即 $U_m = I_m X_L$。

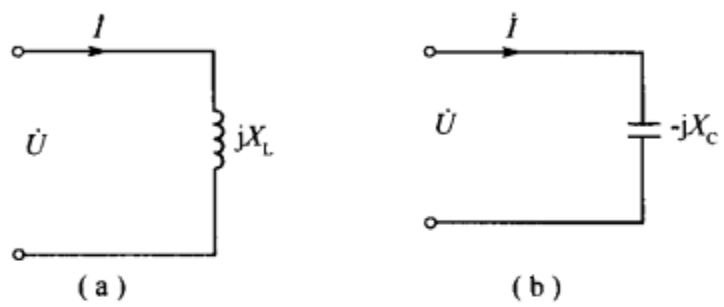


图 6-67　纯电感和纯电容电路

电流 i 和电压 u 的瞬时表达式对应的复数形式为：

$$\dot{I} = Ie^{j0°} = I\angle 0°$$

$$\dot{U} = Ue^{j90°} = U\angle 90°$$

所以

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I}e^{j90°}$$

由于纯电感电路符合电压和电流的有效值符号欧姆定律，即 $U = IX_L$，$X_L = \frac{U}{I}$，所以

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I}e^{j90°} = jX_L，即$$

$$\dot{U} = jIX_L = j\,\dot{I}\omega L \qquad (6-48)$$

式 6-47 是纯电感电路欧姆定律的向量复数式。

(2) 纯电容电路

对于纯电容电路，如图 6-67(b) 所示。设输入电压 $u = U_m \sin\omega t$，由于纯电容电路中，电流比电压滞后 90° 所以，$i = I_m \omega L \sin(\omega t + 90°)$。

电压 u 和电流 i 的瞬时表达式对应的复数形式为：

$$\dot{U} = Ue^{j0°} = U\angle 0°$$

$$\dot{I} = Ie^{j90°} = I\angle 90°$$

所以

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I}e^{-j90°}$$

由于纯电容电路符合电压和电流的有效值符号欧姆定律，即 $U = IX_C$，$X_C = \frac{U}{I}$，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

所以

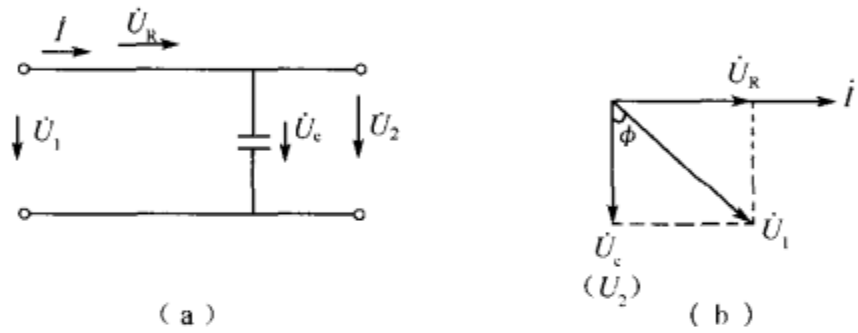
$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I}e^{-j90^\circ} = -jX_C，即$$

$$\dot{U} = -jIX_C = -j\frac{\dot{I}}{\omega C} = \frac{\dot{I}}{j\omega C} \tag{6-49}$$

式(6－49)是纯电容电路欧姆定律的向量复数式。

2. 交流电路的频率特性分析

如图 6-68(a) 是一个 RC 电路，$\dot{U}_1$ 是输入信号电压，$\dot{U}_2$ 是输出信号电压，现在讨论两者大小的比值$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$ 及相位差 ϕ 与角频率 ω 的关系。



（a）　　（b）

图 6-68　RC 电路

根据电路图，画出向量图如图 6-68(b) 所示。

电路的输出电压为

$$\dot{U}_2 = \dot{I} \times \frac{1}{j\omega c} = \frac{\dot{U}_1}{R + \frac{1}{j\omega C}} \times \frac{1}{j\omega C} = \frac{\dot{U}_1}{1 + j\omega RC}$$

通常输出电压与输入电压的比值称为电路的传递函数，它是一个复数。

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle -\arctan(\omega RC) = T(\omega) \angle \phi(\omega)$$

式中 $T(\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$ 是输出电压与输入电压有效值的比值，是角频率 ω 的函数；$\phi(\omega) = -\arctan(\omega RC)$ 是输出电压与输入电压之间的相位差，也是角频率 ω 的函数。

表示 $T(\omega)$ 随 ω 变化的特性称为幅频特特；表示 $\phi(\omega)$ 随 ω 变化的特性称为相频特性，两者统称为频率特性。

由以上公式或向量图都可以看出，当

$$\omega = 0 \text{ 时}，T(\omega) = 1，\phi(\omega) = 0$$

$$\omega = \infty \text{ 时}，T(\omega) = 0，\phi(\omega) = -\frac{\pi}{2}$$

又当

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC} \text{ 时}，T(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707，\omega(\phi) = -\frac{\pi}{4}$$

即当输出电压下降到输入电压的 70.7% 时，两者的相位差为 $-\frac{\pi}{4}$ 。在实际应用中，为了不使输出电压下降过多，特规定此为最低限，对应的 ω_0 称为截止角频率。频率特性如图 6-69 所示。

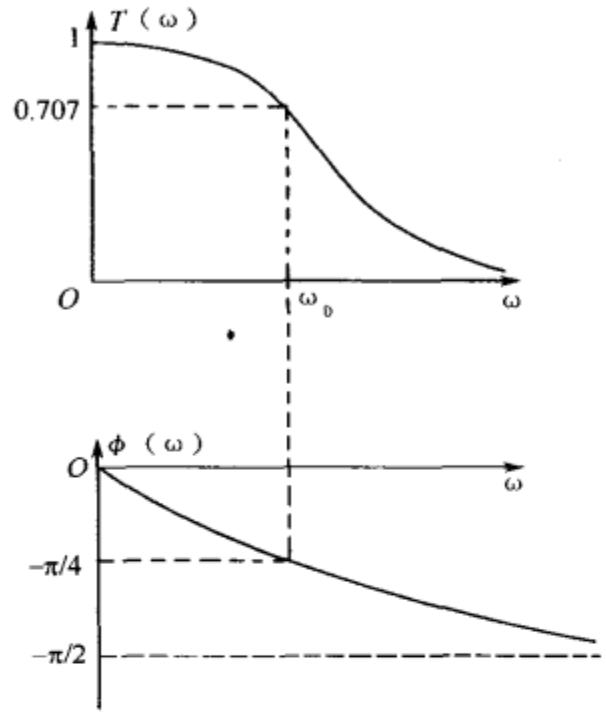


图 6-69　频率特性

当 $\omega < \omega_0$ 时，$T(\omega)$ 变化不大，接近等于 1；当 $\omega > \omega_0$ 时，$T(\omega)$ 明显下降。这表明，上述 *RC* 电路具有使低频信号通过，而抑制较高频率信号通过的作用，这就是前面已作过介绍的低通滤波器。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第七章　三相交流电路与安全用电

仔细观察，可以发现马路旁电线杆上的电线共有 4 根，而进入居民家庭的进户线只有两根。这是因为电线杆上架设的是三相交流电的输电线，进入居民家庭的是单相交流电的输电线。自从 19 世纪末世界上首次出现三相制以来，它几乎占据了电力系统的全部领域。目前世界上电力系统所采用的供电方式，绝大多数是属于三相制电路。三相交流电比单相交流电有很多优越性，在用电方面，三相电动机比单相电动机结构简单，价格便宜，性能好；在送电方面，采用三相制，在相同条件下比单相输电节省输电线的用铜量。实际上单相电源就是取三相交流电源的一相，因此三相交流电得到了广泛的应用。本章主要讨论三相交流电路及用电安全知识。

第一节　三相交流电源

一、三相交流电的产生

使一个线圈在磁场里转动，电路里只产生一个交变电动势，这时发出的交流电叫做**单相交流电**。如果在磁场里有三个互成角度的线圈同时转动，电路里就产生三个交变电动势，这时发出的交流电叫做**三相交流电**。

图 7-1 是三相发电机的示意图。在铁芯上固定着三个相同的线圈 AX、BY、CZ，始端是 A、B、C，末端是 X、Y、Z。三个线圈的平面互成 120°角。匀速地转动铁芯，三个线圈就在磁场里匀速转动。三个线圈是相同的，它们发出的三个电动势，最大值和频率都相同。

这三个电动势的最大值和频率虽然相同，但是它们的相位并不相同。由于三个线圈平面互成 120°角，所以三个电动势的相位也互差 120°。取图 7-1 所示(a)的瞬间作为时间起点，这三个电动势可以分别表示为：

$$e_A = E_m \sin\omega t$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120°)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240°) = E_m \sin(\omega t + 120°)$$

它们的图像如图 7-2 所示。

三相交流电依次出现正的最大值的次序称为相序，顺时针按 A→B→C 的次序循环的相序称为顺序或正序，按 A→C→B 的次序循环的相序称为逆序或负序。相序是由发电机转子的旋转方向决定的，通常都采用顺序。三相发电机在并网发电时或用三相电驱动三相交流电动机时，必须考虑相序的问题，否则会引起重大事故，为了防止接线错误，低压配电线路中规定用颜色区分各相，黄色表示 A 相，绿色表示 B 相，红色表示 C 相。

我国低压供电标准为 50Hz、380/220V，而日本及西欧某些国家采用 60Hz、110V 的供电标准，在使用进口电器设备时要特别注意，电压等级不符，会造成电器设备的损坏。

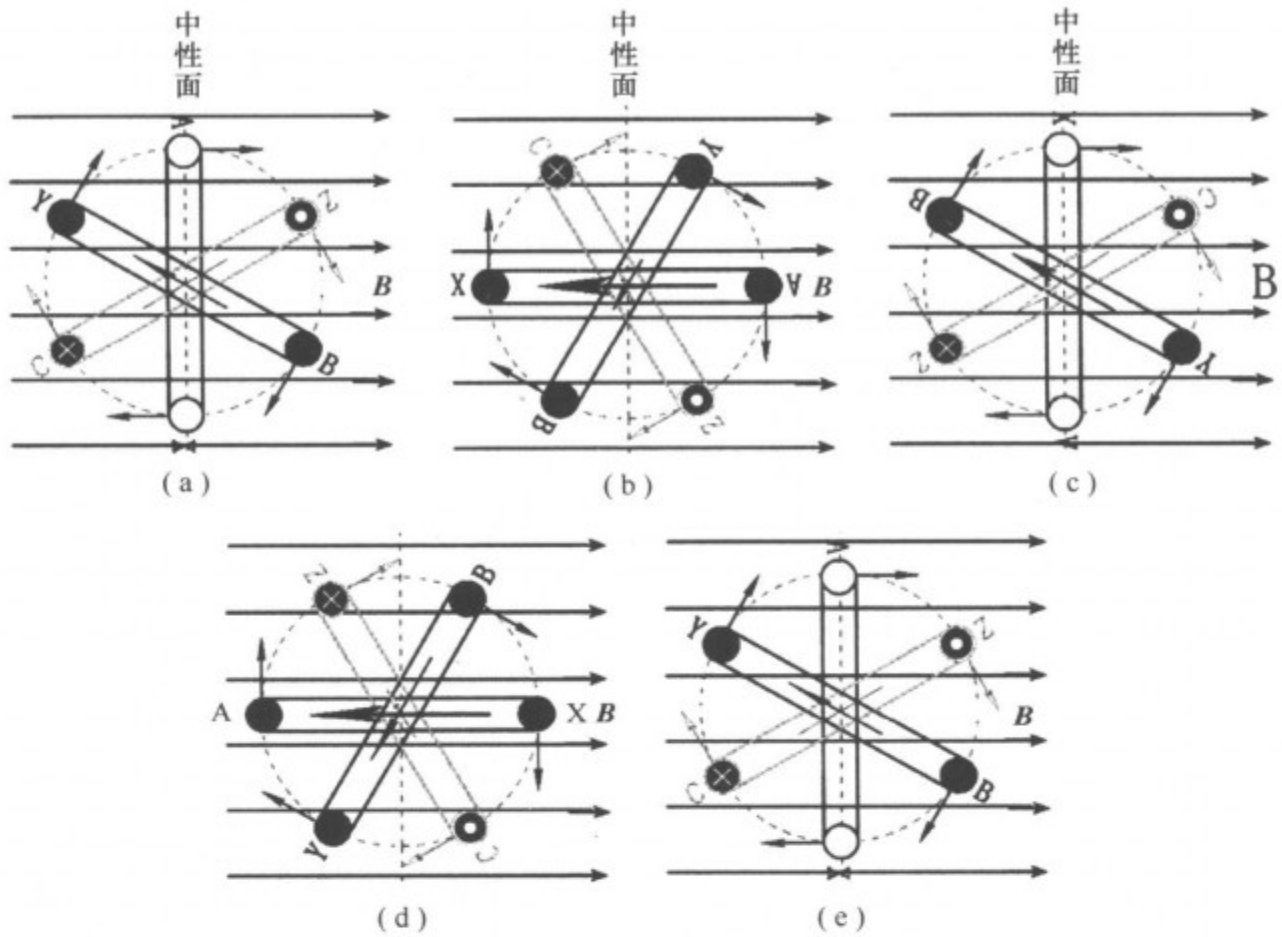


图 7-1　三相交流电的产生

(a)$t=0$；(b)$t=T/4$；(c)$t=T/2$；(d)$t=3T/4$；(d)$t=T$。

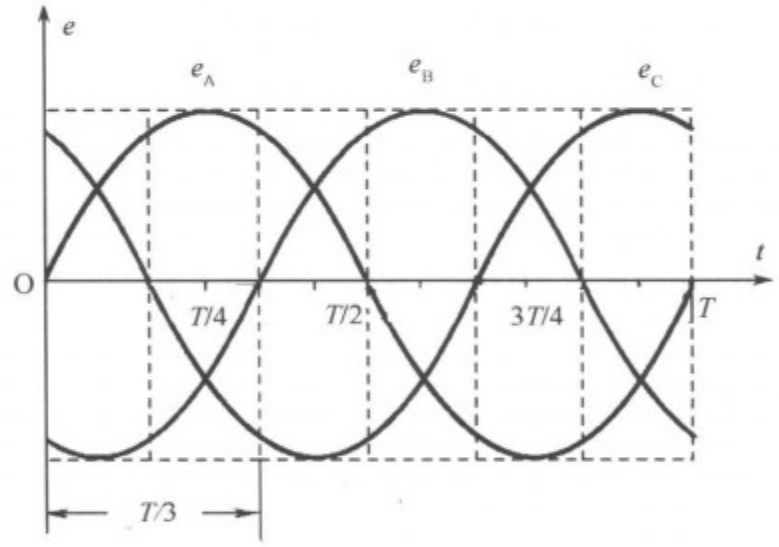


图 7-2　三相电动势波形图

二、三相电源的连接方式

1. 发电机三相绕组的星形接法

发电机三相绕组通常采用星形接法，如图 7-3 所示。

将绕组的三个末端 X、Y、Z 连在一起，成为一个公共点，称为电源的中性点或零点，用 N 表示。由首端 A、B、C 和中点 N 引出四根导线与外电路连接，构成三相四线制电源。其中从首端引出的三根导线称为相线或端线，俗称火线，用字母 A、B、C 表示或用黄、绿、红颜色标记。从中性点引出的导线称为中线（或零线），有时中线接地，也称地线，用字母 N 表示，并用黑色标记。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

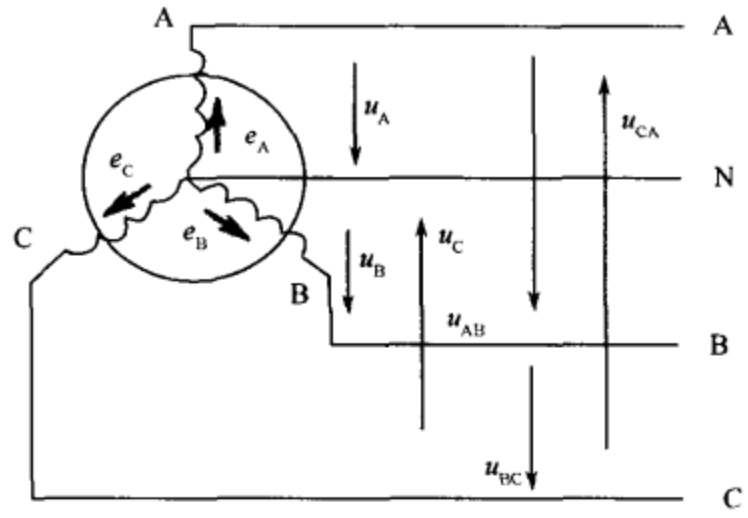


图 7-3　发电机三相绕组星形接法

2. 相电压与线电压

在三相四线制电源中，可以获得两种电压，即相电压和线电压。

相电压是指电源每相两端之间的电压，即相线与中线之间的电压，并规定相电压的参考方向是从相线指向中线。其有效值用 U_A、U_B、U_C 表示，或一般地用 U_P 表示。

线电压指相线与相线之间的电压，其有效值用 U_{AB}、U_{BC}、U_{CA} 表示，或一般地用 U_l 表示。线电压与相电压之间的关系为：

$$U_l = \sqrt{3}U_p \tag{7-1}$$

我国日常电路中，相电压是 220V，线电压是 380V（$380=\sqrt{3}\times220$）。工程上，讨论三相电源电压大小时，通常指的是电源的线电压。如三相四线制电源电压 380V，指的是线电压 380V。

重点提示：线电压与相电压之间的关系可用向量图表示，如图 7-4 所示。

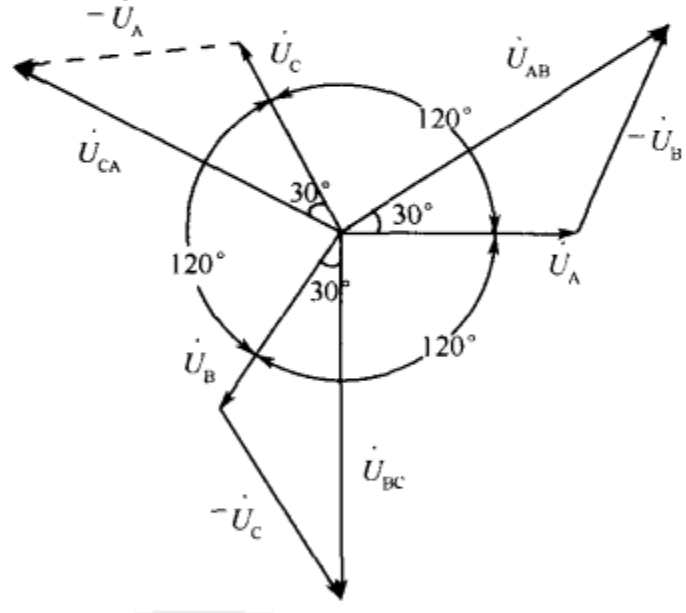


图 7-4　线电压与相电压之间的关系

从图中可以看出，三个线电压之间的相位差仍为 120°，它们比三个相电压各超前 30°，相电压对称，线电压一定也对称。从向量图上可以看出，$U_{AB}=2U_A\cos30°=2\times\frac{\sqrt{3}}{2}U_A=\sqrt{3}U_A$。

同理，可得

$$U_{BC}=\sqrt{3}U_B$$
$$U_{CA}=\sqrt{3}U_C$$

第二节　三相电路负载的连接

交流用电设备（负载）一般分三相和单相两种类型。小功率设备如照明灯、家用电器

以及工业上需用单相电源供电的用电设备，统称为单相负载。三相用电设备主要是工农业生产中使用量极大的三相电动机以及其他三相负载，它们与三相电源连成整体组成三相电路。因此，三相电路中，既有三相负载又有单相负载。

在三相供电系统中，负载有两种基本接法，星形(Y)接法和三角形(△)接法，下面对这两种不同负载的接法进行讨论。

一、负载星形连接的三相电路

1. 对称负载星形连接

如图 7-5 所示的三相四线制电路，设其线电压为 380V，负载连接要应视其额定电压而定。通常，电灯(单相负载)的额定电压为 220V，因此，要接在火线与中线之间。电灯负载是大量使用的，不能集中接在一相中，从总的线路来说，它们应当比较均匀地分配在各相之中。电灯的这种连接法称为星形连接。至于其他单相负载，如单相电动机、电炉、继电器等，是接在火线之间还是火线与中线之间，应视额定电压是 380V 还是 220V 而定，如果负载的额定电压不等于电源电压，则需用变压器，例如，某设备照明灯的额定电压为 36V，就要用一个 380/36V 的降压变压器。

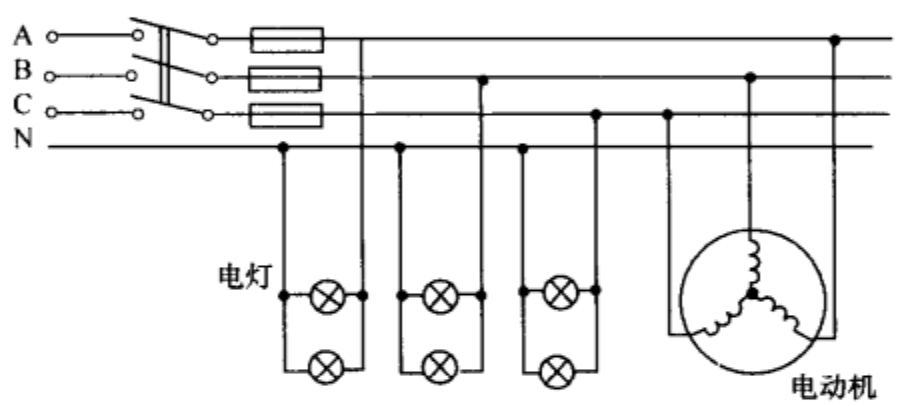


图 7-5　电灯与电动机的星形连接

三相电动机的三个接线端总是与电源的三根火线相连。但电动机本身的三相绕组可以连成星形或三角形，它们的连接方法在铭牌上标出。例如，电动机的铭牌上标有“380/220V、Y/△”字样，说明当电源线电压为 380V 时，电动机连接成 Y 形；当电源线电压为 220V 时，电动机连接成△形。可见，电动机每相绕组的额定电压为 220V。铭牌上标有“380、△”字样，说明电动机连接成△。应接在 380V 电源上。可见，电动机每相绕组的额定电压为 380V。因此，三相负载必须按铭牌给出的额定电压和连接方式与电源相连。

负载星形连接的三相四线制电路一般可用图 7-6 表示。

电路中，Z_A、Z_B、Z_C 分别是 A、B、C 相的负载，且 $Z_A=Z_B=Z_C$，它们可以是三相交流电动机的三相绕组，也可以是三个单相负载组成的三相负载，三个负载的一端接于火线 A、B、C，另外三个端点接在一起，称为负载中点 N′，并将 N′与电源中点 N 相连。

负载星形连接时，如果忽略输电线路上的阻抗压降，每相负载的电压等于相应电源的相电压，等于电源线电压的$\frac{1}{\sqrt{3}}$倍，即

$$U_p=\frac{1}{\sqrt{3}}U_l \tag{7-2}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

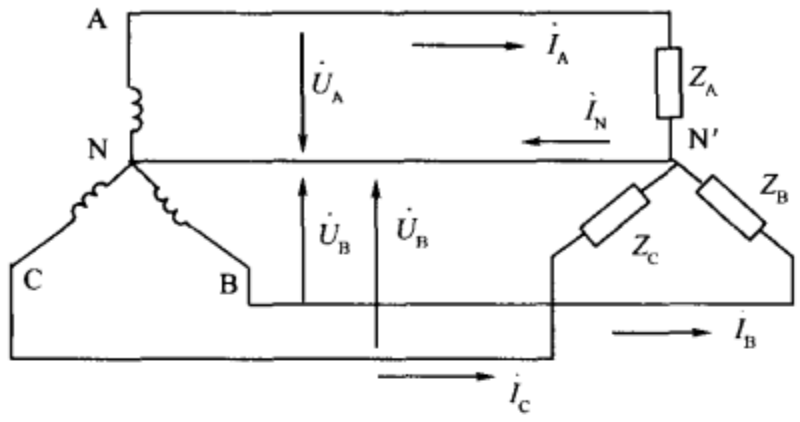


图 7-6　负载星形连接的三相四线制电路

三相电路中的电流也有相电流与线电流之分，每相负载中的电流 I_p 称为相电流，每根火线中的电流 I_l 称为线电流。在负载为星形连接时，显然相电流即为线电流，即

$$I_p = U_l \tag{7-3}$$

对称三相负载星形连接的电路，其各相负载电流的幅度相等，各相电流的相位差依次相差 120°，因此 I_A、I_B、I_C 三个相电流是对称的，中线电流 I_N 为 0。

正是由于中线电流为 0，所以动力电通常省去中线而采用三相三线制星形供电方式。尽管没有中线，由于负载的对称性，保证了负载中点 N′和电源中点 N 的电位相等。

2. 不对称负载星形连接

如果三相负载的阻抗不相等，就是三相不对称负载。这种情况主要发生在三相四线制作低压照明供电的线路中，通常居民住宅楼的配电是每单元引出一相照明电，三个单元为一组接成星形三相负载。众所周知，各家拥有的家用电器和照明灯具的数量有很大差异，不同的电器其阻抗的大小与性质不同，各家使用电器设备的时间又是随意的。因此，照明线路基本上是处于三相不对称负载运行状态。此时，各相电流不相等，中线电流也不为 0。由于中线的存在，即使三相负载不对称，负载的三个相电压仍然等于对称的电源相电压，因此，负载的相电压总是对称的，而使负载工作正常。

当出现中线断开时，就会使其中一相或两相电压升高，造成负载的相电压不等于电源的相电压。其中，某些负载的相电压会超过额定值，从而引起损坏；某些负载的相电压会过低，从而不能正常工作；同时，负载中点（零线）会带电。三相负载越不对称，上述现象越严重，居民区出现的大范围烧毁家用电器的事故多数是中线断路引起的。

例 1：有 220V、100W 的电灯 30 个，应如何接入线电压为 380V 的三相四线制电路？求负载在对称情况下的线电流。

解：由于负载的额定电压为 220V，电源的相电压为 $\frac{380}{\sqrt{3}}=220\text{V}$，故电灯应接成星形，负载对称情况，电路如图 7-7 所示，图中 FU 是熔断器。

负载对称时，30 个灯泡应平均安装在三相，且全部接通，每相电灯数为 $N=30/3=10$ 个，每个电灯电阻为：

$$R=\frac{U^2}{P}=\frac{220^2}{100}=484(\Omega)$$

电灯全部接通时，每相负载电阻为：

$$R_p=\frac{R}{N}=\frac{484}{10}=48.4(\Omega)$$

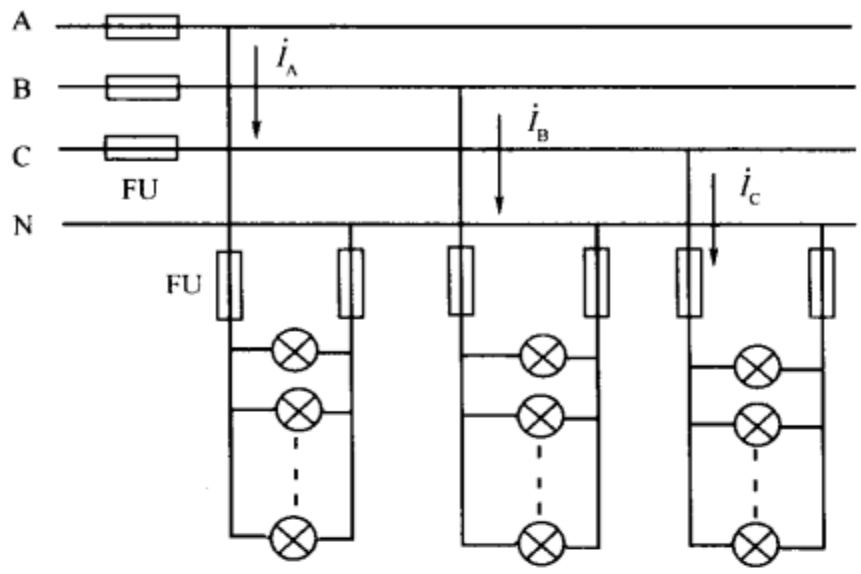


图 7-7　例 1 图

各相电流的有效值为：

$$R_p=\frac{U}{R_p}=\frac{220}{48.4}=4.55(\Omega)$$

因负载星形连接，故

$$I_l=I_p=4.55\text{A}$$

因为电灯是纯电阻负载，故相电流与相电压同相，各相相位互差 120°，且中线电流为零。

本例所述的是由单相负载组成的三相对称负载电路。大多数情况下，低压供电系统中三相载是不对称的，如本题中照明用户不一定任何时候都全部接通，即产生了负载的不对称。

例 2：如图 7-8 所示三相供电线路，接入三相电灯负载，线电压为 380V，每相负载电阻 R 为 500Ω。求：①正常工作时，电灯两端的电压和通过电灯的电流；②如果 A 断开，其他两相电灯的电压和电流。

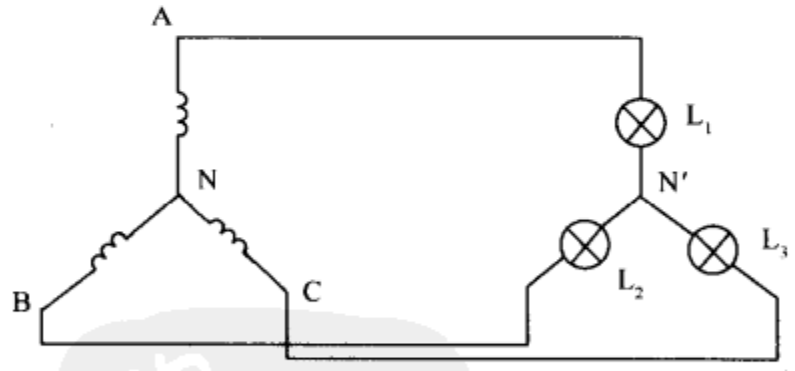


图 7-8　例 2 图

解：这是一个三相交流电路的三线星形接法，由于三相负载电路的阻值相同，所以电路的正常工作情况和三相四线制的星形接法一样。

①由于线电压为 380V，故相电压应该为 220V，所以每一相负载电灯的电压均为 220V，电阻为 500Ω，电流为 0.44A。

②如果 A 相断开，则意味着在 BC 之间接入两路串联的负载电灯，负载两段的电压为 380V 的线电压，电路的总电阻为 500Ω×2＝1000Ω，所以电流则为 0.38A，而加在每一组负载电灯上的电压为 190V。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

由本例可知，对于对称负载星形连接，若没有中线，当断开一相时，加在另两相负载上的电压为线电压的一半(190V)。

例 3：如图 7-9 所示三相供电线路，接入额定电压为 220V 的灯泡 L_1、L_2、L_3，电源线电压为 380V。三个灯泡的阻值分别为 $R_1=10\Omega$、$R_2=30\Omega$、$R_3=10\Omega$。求 A 相断开，中线因故也断开时，各相负载两端的电压。

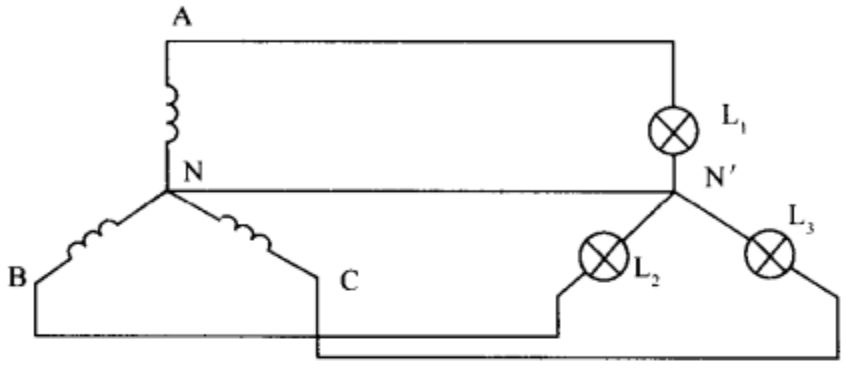


图 7-9　例 3 图

解：正常情况下，由于有中线，所以各灯泡两端的电压等于电源相电压，有效值为 220V，灯泡工作正常。但是，当 A 相断开，中线因故也断开时，A 相灯泡 L_1 两端的电压为 0，B 相和 C 相串联起来接于线电压 U_{BC} 上。

这时，L_2 灯泡承受的电压为：

$$U_2=\frac{R_2}{R_2+R_3}U_{BC}=\frac{30}{10+30}\times 380=285(\text{V})$$

L_3 灯泡承受的电压为：

$$U_3=\frac{R_3}{R_2+R_3}U_{BC}=\frac{30}{10+30}\times 380=95(\text{V})$$

显然，L_2 灯泡两端的电压已大大超过其额定电压，这是不允许的。由此可以看到，不对称负载进行星形连接时必须要有中线。中线的作用在于保证三相负载的相电压对称，使负载能正常工作，为此，规定中线上不准装闸刀开关，也不准装熔断器。

二、负载三角形连接的三相电路

负载三角形连接的三相电路一般可用图 7-10 所示的电路表示。电路中，Z_{AB}、Z_{BC}、Z_{CA} 为每相的负载。

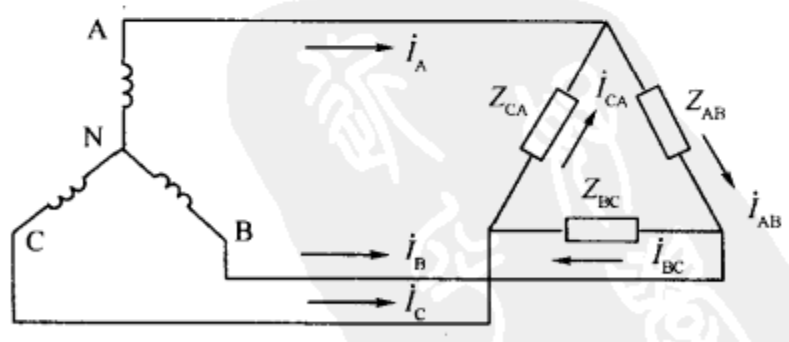


图 7-10　负载三角形连接的三相电路

负载三角形连接时，因为各相负载都直接接在电源的线电压上，所以，负载的相电压与电源的线电压相等。因此，不论负载对称与否，其相电压总是对称的，即：

$$U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}=U_l=U_p \tag{7-4}$$

在负载三角形连接时，相电流和线电流是不一样的，经计算，如果负载对称，线电流是相电流的$\sqrt{3}$倍，且线电流的相位滞后相电流 30°。即：

$$I_l=\sqrt{3}I_p \tag{7-5}$$

三相电动机的绕组可以接成三角形，也可以接成星形，而照明负载都接成星形（具有中线）。

第三节　三相电路的功率

一、有功功率

不论负载是星形连接还是三角形连接，总的有功功率必定等于各相有功功率之和，不论三相负载是否对称，都有如下关系：

$$P=P_A+P_B+P_C=U_AI_A\cos\phi_A+U_BI_B\cos\phi_B+U_CI_C\cos\phi_C$$

式中：U_A、U_B、U_C是三相负载的相电压；I_A、I_B、I_C是三相负载的相电流；ϕ_A、ϕ_B、ϕ_C是各相负载相电压、相电流的相位差。

当三相负载对称时，每相的有功功率是相等的。因此，三相总功率为：

$$P=3U_pI_p\cos\phi \tag{7-6}$$

当对称负载是星形连接时，$U_l=\sqrt{3}U_p$，$I_l=I_p$；当对称负载是三角形连接时，$U_l=U_p$，$I_l=\sqrt{3}I_p$。不论对称负载是星形连接还是三角形连接，如将上述关系式代入式(7-6)，则得：

$$P=\sqrt{3}U_pI_p\cos\phi \tag{7-7}$$

二、无功功率和视在功率

三相电路的无功功率用于衡量三相电源与三相负载中的储能元件进行能量交换的规模。根据能量守恒定律，三相电路的无功功率等于三相负载无功功率之和，即

$$Q=Q_A+Q_B+Q_C=U_AI_A\sin\phi_A+U_BI_B\sin\phi_B+U_CI_C\sin\phi_C$$

在负载对称时，有如下关系：

$$Q=3U_pI_p\sin\phi \tag{7-8}$$

或者：

$$P=\sqrt{3}U_lI_l\sin\phi \tag{7-9}$$

无功功率不能被负载吸收，不能转换成人们所需要的能量形式，只是在电路中反复传送，一会儿从电源传送给负载，一会儿又从负载反送给电源。无功功率的传送不仅白白占用了电网的有限资源，加大线路的损耗，同时还对电网和发电机组的运行带来有害的影响。三相异步交流电动机是三相电路的主要负载，其用电量占总动力电的 80%以上。因此，三相负载以电感性为主。为了改善负载的功率因数，配电室中都备有大型电力电容柜以调整三相负载的阻抗角。

三相电路的视在功率是三相电路可提供的最大功率，也就是电力网的容量。

$$S=\sqrt{P^2+Q^2}=3U_pI_p=\sqrt{3}U_lI_l \tag{7-10}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

式(7-10)表明，提高功率因数，减少电路中的无功功率，是充分发挥电网供电能力的重要措施。

例 4： 有一台三相电动机，其每相的等效电阻 $R=29\Omega$，等效感抗 $X_L=21.8\Omega$，试求在下列两种情况下电动机的相电流、线电流以及从电源输入的功率。①绕组连成星形接于 $U_l=380V$ 的电源上；②绕组连成三角形接于 $U_l=220V$ 的电源上。

解：①绕组连成星形接于 $U_l=380V$ 的电源上时：

$$I_p=\frac{Up}{|Z|}=\frac{220}{\sqrt{29^2+21.8^2}}=6.1(A)$$

$$I_l=6.1A$$

$$P=\sqrt{3}U_l I_l\cos\phi=\sqrt{3}\times380\times6.1\times\frac{29}{\sqrt{29^2+21.8^2}}=3200(W)=3.2(kW)$$

② 绕组连成三角形接于 $U_l=220V$ 的电源上时：

$$I_p=\frac{Up}{|Z|}=\frac{220}{\sqrt{29^2+21.8^2}}=6.1(A)$$

$$I_l=\sqrt{3}I_p=\sqrt{3}\times6.1=10.5(A)$$

$$P=\sqrt{3}U_l I_l\cos\phi=\sqrt{3}\times220\times10.5\times\frac{29}{\sqrt{29^2+21.8^2}}=3200(W)=3.2(kW)$$

有的三相电动机有两种额定电压，比如 220/380V，这表示当电源电压(指线电压)为 220V 时，电动机的绕组连成三角形；当电源电压为 380V 时，电动机应连成星形。在这两种接法中，相电压、相电流及功率都未改变，仅线电流在连成三角形的情况下为连成呈形的情况下的$\sqrt{3}$倍。

第四节　供电与用电

一、电力系统组成

电力是现代工业主要动力，电力系统是由电压不等的电力线路将一些发电厂和电力用户联系起来的一个发电、输电、变电、配电和用电的整体。

1. 发电厂

发电厂种类很多，有火力发电厂、水力发电厂、原子能发电厂、风力发电厂等。目前，各国都以火力发电和水力发电为主。各类发电厂中的发电机几乎都是三相同步发电机。

2. 电力网

电力网由变电所和各种不同的电压等级的线路组成，其任务是将电能输送、变换和分配到电能用户。

电力网分为输电网(35kV 及以上的电力网，是电力系统的主干网)和配电网(10kV 及以下的电力网，其作用是将电能分配给各类不同的用户)。为加强供电的可靠性、稳定性，通常电力网形成环网。

3. 电力用户

电力用户也称电力负荷，或称电力负载。根据其重要程度可分为一级负荷、二级负荷

和三级负荷。

一级负荷是指中断供电将造成人身伤亡或带来大的经济损失，或在政治上造成重大影响的电力负荷。主要包括火车站、大会堂、炼钢炉、重点医院的手术室等。对一级负荷，应双电源供电，且设应急电源。

二级负荷主要是指中断供电将在政治经济上造成较大损失的电力负荷，对二级负荷应由双回路供电。

三级负荷是一般的电力负荷，属不重要负荷，对供电无特殊要求。

二、能源的利用

电能是由其他非电能源经过转换产生的，如水力，火力、风力、核能、太阳能等。目前世界上建造得最多的是火力发电厂和水力发电厂，近几年核电站也发展很快。

1. 水力发电

水力发电是利用河流中蕴藏着的水能来生产电能。其基本原理是：在河流上建筑拦河坝，将分散的水能资源集中起来，然后靠引水管道等引取水流推动水轮发电机组（水轮机和发电机的组合）转动，在机组转动的过程中，将水能转变为电能。

水能资源是不会枯竭的再生能源，其发电成本比较低廉；水力发电不污染环境，是一种清洁能源，但其建成投产时间很长。

2. 火力发电

火力发电是将燃料（如煤炭）产生的热能转变为电能。其基本原理是：矿物燃料（煤炭、石油、天然气等）燃烧放出热能，锅炉里水吸收热能产生一定温度和压力的水蒸气，然后推动蒸汽轮机转动，将热能转变为电能。

火力发电对环境和生态的污染较为严重，燃料燃烧排放出的 CO_2、SO_2 等酸性气体会形成酸雨，危害动植物；大气中过量的 CO_2 会加剧“温室效应”，破坏生态平衡。

3. 核能发电

核能发电是将核裂变或核聚变产生的能量转变为电能。其基本原理是：在核电站中，核反应产生的热量将水加热为蒸汽，然后像火力发电一样，用蒸汽推动蒸汽轮机转动，带动发电机发电。

核燃料能量高度集中，且极为丰富，1kg 铀 235 核燃料全部裂变放出的热能，相当于 2600t 左右标准煤的热量。核聚变燃料氘和氚可以从海水中提取，核变燃料可以说是取之不尽的。核电站的放射性废气与废液的排放量很少，仅为火力发电放射物质排放量的 1/3。因此核电站对环境的污染较小。

核电站的安全性是最敏感的问题，1979 年美国宾州三里岛核电站事故和 1986 年苏联切尔诺贝利核电站加剧了人们对核电站的恐惧心理。但核能发电 30 多年来，仍然得到了快速的发展，技术上已达成熟。能源资源相对缺乏的工业化国家，如法国、德国，核电建设速度较快。1991 年我国第一座核电站——秦山核电站发电成功，随后，在广东省大亚湾建立了核电站。到 21 世纪中叶，核电将可能成为我国的主要能源之一。

4. 其他发电方式

（1）磁流体发电

磁流体发电的基本原理是利用燃料燃烧生成的高温（约 2500K）等离子气体（即热电

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

离产生的电离气体)以一定的速度穿过磁场切割磁力线。根据电磁感应原理,流体中的带电离子受到电磁力的作用,正负电荷朝着与气体运动方向和磁力线方向相互垂直的两侧偏转,两侧便出现了感应电动势。

磁流体发电的特点在于热能直接转换为电能,其装置中没有旋转部件且环境污染小。

(2)燃料电池

燃料电池由燃料电极(负极)、氧化剂电极(正极)和电解质构成。

在负极上燃料燃烧,进行氧化反应,释放电子;正极上同时进行还原反应,产生的负离子通过电解质到达负极,负极释放的电子通过内部负载后进入正极,因而负载得到了电能。

燃料电池可以将能量直接变换为电能,能量转换率高,不污染环境,几乎没有噪声,有其特殊的发展前景。

三、电能的输送

发电是为用电服务的。从发电站到用电设备总有一段距离,水电站只能建在河流上,火电站有时要建在煤矿附近,与城市以及分布很广的农村都有距离,即使建筑在城市里的发电站,与城市里的用电设备也有距离,这样就产生了电能输送的问题。

电能便于输送,用导线把电源和用电设备连接起来,就可以实现电能的输送。但是,导线有电阻,电流通过时要发热,这个热量毫无用处,是一种浪费。在电能的输送中要研究如何减少这种能量损耗,以便有效地利用电能。

设导线的电阻为 R,通过的电流为 I,那么在导线上损耗的电功率是 $P=I^2R$。又设导线的总长度为 l,导线的横截面积为 S,从电阻定律知道 $R=\rho\frac{1}{S}$。

要减少能量损耗,一种办法是减小导线的电阻。导线材料一经选定(现在多用铝导线),电阻率 ρ 就确定了,导线的总长度由输电距离决定,不能改变。所以要减小电阻,只有增大导线的横截面积。

增大导线的横截面积,就要多耗费金属材料,而且导线太重,给架设也带来困难。因此,单纯用增大导线的横截面积来减少能量损耗,不是一种理想的办法。实际上,有时即使把横截面积增大到十分惊人甚至实际做不到的程度,也不能把能量损耗降低到所能允许的数值范围内。例如,要把功率为 200kh 的电能输送到 10km 外的地方,如果用 110V 的电压输电,并且使能量损耗为输送电能的 10%,就要用横截面积约为 96000mm^2 的铝线。显然,导线太粗了。

减少能量损耗的另一种办法是减小电流。在输送功率不变的情况下,要减小电流,就必须提高输电电压。在上面的例子中,如果用 11kV 的电压来输电,也就是说,把输电电压提高到 10^2 倍,电流就减小为原来的 10^{-2}。能量损耗与电流的平方成正比,所以能量损耗就减小为原来的 10^{-4}。要使能量损耗仍为输送电能的 10%,导线的横截面积就可以减小为原来的 10^{-4}。,也就是用 9.6mm^2 的导线就行了。可见,用提高输电电压的办法来减少能量损耗是行之有效的。

但输电电压也不是无条件地越高越好。电压提高了,花在绝缘上的费用要相应地增加。能量损耗在所能允许的数值范围之内,提高输电电压固然可以减小导线的横截面积,

但从机械强度方面考虑，导线又不能太细，导线太细容易被拉断。高压输电还必须考虑在导线上因产生电晕放电而损失的能量。电压越高，导线越细，产生电晕放电的可能性越大。为了避免电晕放电，有时还需要把导线加粗。可见，输电电压并不是毫无限制可以任意提高的。

实际输送电能时，要综合考虑各种因素，依照不同情况选择适合的输电电压。如果输送功率比较大，输电距离比较远，就要采用较高的电压输电。电压低了，势必要加大导线的横截面积。如果输送功率不太大，距离也不太长，就不必用太高的电压输电。这时能量损耗不会太大，电压高了反而增加花在绝缘上的费用，而且导线因机械强度的限制又不能太细。例如，输送功率为100kW 以下，距离为几百米以内，一般采用 220V 的电压送电。这就是通常用的低压线路。输送功率为几千千瓦到几万千瓦，距离为几十千米到上百千米，一般采用 35kV 或 110kV 的电压送电。这就是所谓高压输电。如果输送功率为 10 万 kV 以上，距离为几百千米，就必须采用 220kV 甚至更高的电压送电。这就是所谓超高压输电。

我国远距离输电采用的电压有 110kV、220kV 和 330kV，在少数地区已开始采用 500kV 的电压送电。目前世界上正在试验的最高输电电压是 1150kV。

发电厂中的大型发电机，机端电压最高不超过 26kV，但这样高的电压还不符合远距离输电的要求，所以还必须通过升压变压器，把电压升高到所要求的数值（例如 220kV 或 330kV）再进行输送，输送后的电用电设备不能直接应用，因此，要在一次区域变电所把电压降到 6kV～10kV，其中一部分送往需要高压电的工厂，另一部分送到低压变电所降到 220/380V，送给一般用户。图 7-11 是电能输送示意图。

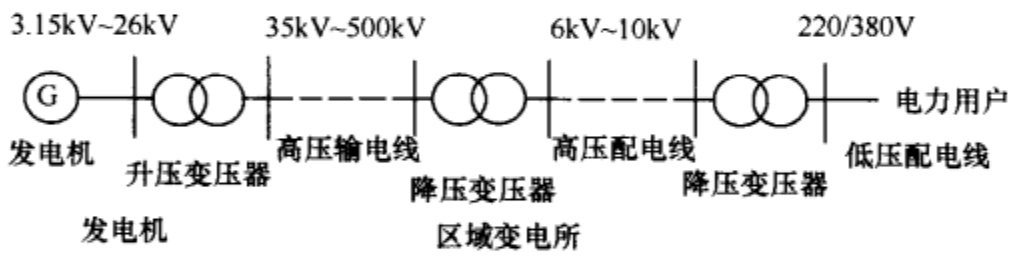


图 7-11　电能输送示意图

例 5：发电机的输出电压为 220V，输出功率为 44kW，每条输电线电阻为 0.2Ω，问：用户得到的电压和电功率各是多少？如果发电站先用变压比为 1∶10 的升压变压器将电压升高，经同样输电线路后，再经过 10∶1 的降压变压器降压后供给用户，则用户得到的电压和电功率又是多少？

解：首先要说明发电站输出的功率 $P_{出}$ 是一定的，当以 220V 的电压输出时，输出电流应该是：

$$I=\frac{P_{出}}{U_{出}}=\frac{44000\text{W}}{220\text{V}}=200\text{A}$$

两条输电线路的总电阻为 0.4Ω，则导线上损失的电功率为：

$$P_{损}=I^2r=(200\text{A})^2\times0.4\Omega=16\text{kW}$$

用户得到的电功率为：$P=P_{出}-P_{损}=44\text{kW}-16\text{kW}=28\text{kW}$

在导线上损失的电压为：$U_{损}=Ir=200\text{V}\times0.4\Omega=80\text{V}$

用户得到的电压为：$U=U_{出}-U_{损}=220\text{V}-80\text{V}=140\text{V}$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

如果用 1∶10 的变压器将电压升高到 2200V 后再输送出去，则输出电流为：

$$I=\frac{P_{出}}{U_{出}}=\frac{44000\text{W}}{2200\text{V}}=20\text{A}$$

$$P_{损}=I^2r=(20\text{A})^2\times0.4\Omega=160\text{W}$$

用户得到的电功率为：$P=P_{出}-P_{损}=44\text{kW}-160\text{W}=43.84\text{kW}$

在导线上损失的电压为：$U_{损}=Ir=20\text{V}\times0.4\Omega=8\text{V}$

加到用户端变压器上的电压为：$U=U_{出}-U_{损}=2200\text{V}-8\text{V}=2192\text{V}$

经过变压器降压后输送给用户的电压为：219.2V

阅读材料：交流输电与直流输电

“输电”是“发电”和“用电”的中间环节，现代输电工程中并存着两种输电方式：高压交流输电和高压直流输电。两种方式各有长处和不足，同时使用它们，可以取得更大的经济效益，下面作一简略介绍。

(1)输电方式的变化

人类输送电力，已有一百多年的历史，输电方式是从直流输电开始的。1874 年，在俄国彼得堡第一次实现了直流输电，当时输电电压仅 100V，随着直流发电机制造技术的提高，到 1885 年，直流输电电压已提高到 6000V，但要进一步提高大功率直流发电机的额定电压，存在着绝缘等一系列技术困难，由于不能直接给直流电升压，使得输电距离受到极大的限制，不能满足输送容量增长和输电距离增加的要求。

19 世纪 80 年代末发明了三相交流发电机和变压器，1891 年，世界上第一个三相交流发电站在德国劳风竣工，以 3×10^4 V 高压向法兰克福输电。此后，交流输电就普遍代替了直流输电，但是随着电力系统的迅速扩大，输电功率和输电距离的进一步增加，交流电遇到了一系列不可克服的技术困难，大功率换流器(整流和逆变)的研究成功，为高压直流输电突破了技术上的障碍，因此直流输电重新受到人们的重视。1933 年，美国通用电器公司为布尔德坝枢纽工程设计出高压直流输电装置；1954 年在瑞典，从本土到果特兰岛，建起了世界上第一条远距离高压直流输电工程。

(2)直流输电系统简介

在直流输电系统中，只有输电环节是直流电，发电系统和用电系统仍然是交流电，在输电线路的始端，发电系统的交流电经换流变压器升压后，送到整流器中，整流器的主要部件是可控硅变流器和进行交直流变换的整流阀，它的功能是将高压交流电变为高压直流电后，送入输电线路，直流电通过输电线路送到逆变器中，逆变器的结构与整流器相同而作用相反，它把高压直流电变为高压交流电，再经过换流变压器降压，交流系统的电能就输送到了交流系统中。在直流输电系统中，通过改变换流器的控制状态，也可以把交流系统中的电能送到直流系统中，即整流器和逆变器是可以互相转换的。

(3)交流电和直流电的优缺点比较

高压直流输电方式与高压交流输电方式相比，有明显的优越性。历史上仅仅由于技术的原因，才使得交流输电代替了直流输电。下面先就交流电和直流电的主要优缺点进行比较，从而说明它们各自在应用中的价值。

交流电的优点主要表现在发电和配电方面：利用建立在电磁感应原理基础上的交流

发电机可以很经济方便地把机械能(水流能、风能……)、化学能(石油、天然气……)等其他形式的能转化为电能;交流电源和交流变电站与同功率的直流电源和直流换流站相比,造价大为低廉;交流电可以方便地通过变压器升压和降压,这给配送电能带来极大的方便。这是交流电与直流电相比所具有的独特优势。

直流电的优点主要在输电方面:

① 输送相同功率时,直流输电所用线材仅为交流输电的 2/3～1/2,直流输电采用两线制,以大地或海水作回线,与采用三线制三相交流输电相比,在输电线截面积相同和电流密度相同的条件下,即使不考虑趋肤效应,也可以输送相同的电功率,而输电线和绝缘材料可节约 1/3。设两线制直流输电线路输送功率为 P_d,则 $P_d=2U_dI_d$;设三线制三相交流输电线路输送的功率为 P_a,$P_a=\sqrt{3}U_aI_a\cos\phi$。对于超高压线路,功率因数一般较高,可取为 0.945。设直流输电电压等于交流输电电压的最大值,即 $U_d=\sqrt{2}U_a$,且 $I_d=I_a$,则

$$\frac{P_d}{P_a}=\frac{2\sqrt{2}U_aI_a}{3U_aI_a\times 0.945}\approx 1$$

如果考虑到趋肤效应和各种损耗(绝缘材料的介质损耗、磁感应的涡流损耗、架空线的电晕损耗等),输送同样功率交流电所用导线截面积大于或等于直流输电所用导线的截面积的 1.33 倍。因此,直流输电所用的线材几乎只有交流输电的 1/2。

② 在电缆输电线路中,直流输电没有电容电流产生,而交流输电线路存在电容电流,引起损耗。在一些特殊场合,必须用电缆输电,例如高压输电电线经过大城市时,采用地下电缆;输电线经过海峡时,要用海底电缆。由于电缆芯线与大地之间构成同轴电容器,在交流高压输电线路中,空载电容电流极为可观,一条 200kV 的电缆,每千米的电容约为 0.2μF,每千米需供给充电功率约 3×10^3 kW,在每千米输电线路上,每年就要耗电 2.6×10^7 kW·h。而在直流输电中,由于电压波动很小,基本上没有电容电流加在电缆上。

③直流输电时,其两侧交流系统不需同步运行,而交流输电必须同步运行,交流远距离输电时,电流的相位在交流输电系统的两端会产生显著的相位差;并网的各系统交流电的频率虽然规定统一为 50Hz,但实际上常产生波动,这两种因素引起交流系统不能同步运行,需要用复杂庞大的补偿系统和综合性很强的技术加以调整,否则就可能在设备中形成强大的循环电流损坏设备,或造成不同步运行的停电事故。在技术不发达的国家里,交流输电距离一般不超过 300km,而直流输电线路互连时,它两端的交流电网可以用各自的频率和相位运行,不需进行同步调整。

④ 直流输电发生故障的损失比交流输电小。两个交流系统若用交流线路互连,则当一侧系统发生短路时,另一侧要向故障一侧输送短路电流。因此使两侧系统原有开关切断短路电流的能力受到威胁,需要更换开关。而直流输电中,由于采用可控硅装置,电路功率能迅速、方便地进行调节,直流输电线路上基本上不向发生短路的交流系统输送短路电流,故障侧交流系统的短路电流与没有互连时一样,因此不必更换两侧原有开关及载流设备。

在直流输电线路中,各极是独立调节和工作的,彼此没有影响。所以,当一极发生故障时,只需停运故障极,另一极仍可输送不少于一半功率的电能;但在交流输电线路中,

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

任一相发生永久性故障，必须全线停电。

(4)我国直流输电现状及发展前景

我国在 1977 年就建成了第一条 31kV 直流输电工业性实验电路，我国超高压直流输电工程，有从葛洲坝至上海的 500kV 线路和青海龙羊峡—北京的输电工程。

直流输电在我国有广阔的发展前景，主要体现在如下方面：

① 我国能源与负荷分布不均，需要大容量远距离输电。目前，我国的主要能源(水力资源和煤炭资源)主要集中在西南、中南、西北及华北地区，而负荷则主要集中在京津地区、东北及华东、华南地区。所以不可避免地要进行大容量远距离输电，青海龙羊峡—北京输电线路就属于这一类。

② 用直流线路联络两个交流系统，以取得较大的经济效益。葛洲坝—上海直流输电工程就属于这一类。

③ 用海底电缆跨海送电。我国沿海岛屿众多，许多岛屿(如舟山群岛、海南岛、崇明岛、台湾等)需要由大陆送电或互联并网，舟山直流输电工程就属于这一类。

④ 用直流通过电缆向大城市中心供电，以解决大城市电能日益增长的迫切需要。在英国，已由金斯诺思用直流输电向伦敦供电，我国上海、北京等大城市不久也将会实现。

四、电气照明

照明技术是一门综合性的技术，不仅应用光学和电学方面的知识，还涉及建筑学、生理学和美学等方面的知识，下面对照明系统作简要介绍。

1. 照明技术基本概念

①光通量：光源在单位时间内向周围空间辐射并引起光感的能量大小。用符号 Φ_v 表示，单位 lm(流明)。如 100W 的白炽灯光通量约为 1038 lm。

②发光强度：光源在某方向上的单位立体角所发出的光通量，用符号 I_v 表示，单位 cd(坎德拉)。

③光度：一个单元表面在某一方向上的光强密度。

④照度：照射在物体表面单位面积上的光通量，用符号 E_v 表示，单位 lx(勒克斯)。

⑤显色性：光源显现被照物体颜色的性能，用显色指数 Ra 来定量描述，可见光源的显色指数越高，其显色性越好。

⑥眩光：在一般亮度情况下，视力随亮度的增加而提高，当观察对象周围的亮度比中心亮度高时，则视力显著下降，这种现象称为眩光。

2. 照明方式

① 一般照明：需要的照度是基本均匀的照明，如办公室、教室、商场等场所的照明。

② 局部照明：满足某种需要而设置的固定的或移动的照明，如商场展柜的照明，车间内车床的照明等。

③ 混合照明：由一般照明和局部照明共同组成的照明。如商场大厅为一般照明，展柜商品等采用局部照明。

3. 照明种类

① 正常照明：在正常情况下，为了保证人们工作和生活的顺利进行而采用的人工照

明。在居住房间、办公室、教室等场所，以及室外庭院和场地等，都应设置正常照明。

② 应急照明：在正常照明因故障熄灭后使用的照明。应急照明又包括备用照明、安全照明和疏散照明。

③ 装饰照明：为装饰的需要而设置的照明。如节日彩灯、音乐喷泉内的防水彩灯等。

4. 常用照明电源

用于照明的电光源，按其发光机理可分为热辐射光源（白炽灯、卤钨灯等）和气体放电光源（荧光灯、高压汞灯、高压钠灯等）。下面介绍几种常用的照明电源。

（1）白炽灯

白炽灯是第一代电光源的代表，它是通过通电加热钨丝（达 2400℃～2500℃）使其处于白炽状态而发光的。它的优点是构造简单、价格低、显色性好，但它的发光效率低（为 7 lm/W～19 lm/W），使用寿命较短。

电源电压变化对灯泡的寿命和光效有严重的影响，当电压升高 5%时，寿命将缩短 50%。故使用该灯时电源电压的偏移不宜大于±2.5%。

（2）卤钨灯

卤钨灯是在直径为 12mm 或 13.5mm 的具有钨丝的石英灯管中充入微量的卤化物（碘化物或溴化物），利用卤钨循环来提高发光效率的一种热光源。

卤钨灯具有体积小、功率大、发光效率高（比白炽灯高 30%，约为 21 lm/W）、光色好、光通稳定以及寿命长（平均寿命约为 1500h～5000h）等优点。

（3）荧光灯（俗称日光灯）

低压水银荧光灯，简称荧光灯，它是 20 世纪 30 年代研制的光源，它代表光源史上的第二代。常见的荧光灯管有：直形管状、环形、H 形、双 D 形和双曲型光源。荧光灯是通过汞蒸气放电时发出紫外线，用以激发灯管内壁的荧光粉而发光的。

荧光灯比白炽灯有显著优点：光色好，特别是日光色荧光灯，其光谱曲线接近天然光的谱线，且光线柔和，温度较低，而发光效率却比白炽灯高 2 倍～3 倍（约为 50 lm/W 左右）。使用寿命可达 3000h 以上。

（4）高压水银荧光灯

高压水银荧光灯又称高压汞灯，由它的内管的工作气压为 0.1MPa～0.5MPa 而得名。其发光原理和荧光灯一样，只是构造上增加一个内管。外形和金属卤化物灯一样。它是一种功率大、发光效率高的光源。

（5）金属卤化物灯

金属卤化物灯是在高压汞灯的放电管内添加一些金属卤化物（如碘、溴、钠、铊、铟、镝等金属化合物），通过金属卤化物的循环作用，不断向电弧提供相应的金属蒸气，金属原子在电弧中受激发而辐射该金属的特征光谱线，从而彻底改善了高压汞灯的光色，使该灯发出的光谱接近天然光。该灯不但光色好，发光效率也高，约达 80 lm/W，是目前比较理想的光源，有人称它为第三代光源。

（6）其他电光源

① 高压钠灯：它是利用高压钠蒸气放电，其辐射光的波长集中在人眼较灵敏的区域内，故光效高，为高压水银荧光灯的 2 倍，约为 11 lm/W 左右，且寿命长，但显色性欠佳。多用于城市街道、广场大面积的照明。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

② 低压钠灯：其发光效率为 150 lm/W，发出 589nm 波长光谱，接近于人眼最敏感的 555nm 黄绿光。这种光穿透云雾能力强，适用于街道、航道、机场跑道等的照明。

③ 氙灯：它是一种内充高纯度氙气的弧光放电灯，高压氙气放电时能产生很强的白光，接近连续光谱，和太阳光十分相似，故有“小太阳”之称。

阅读材料：家庭节电小常识

(1) 照明节电

日光灯具有发光效率高、光线柔和、寿命长、耗电少的特点，一盏 14W 节能日光灯的亮度相当于 75W 白炽灯的亮度，所以用日光灯代替白炽灯可以使耗电量大大降低。在走廊和卫生间可以安装小功率的日光灯；看电视时，只开 1W 节电日光灯，既节约用电，收看效果又理想。此外，还要做到人走灯灭，消灭“长明灯”。

(2) 电视机节电

电视机的最亮状态比最暗状态多耗电 50%～60%；音量开得越大，耗电量也越大。所以看电视时，亮度和音量应调在人感觉最佳的状态，不要过亮，音量也不要太大。这样不仅能节电，而且有助于延长电视机的使用寿命。有些电视机只要插上电源插头，显像管就预热，耗电量为 6W～8W。所以电视机关上后，应把插头从电源插座上拔下来。

(3) 电冰箱节电

电冰箱应放置在阴凉通风处，绝不能靠近热源，以保证散热片很好地散热。使用时，尽量减少开门次数和时间。电冰箱内的食物不要塞得太满，食物之间要留有空隙，以便冷气对流；准备食用的冷冻食物，要提前在冷藏室里慢慢融化，这样可以降低冷藏室温度，节省电能消耗。

(4) 洗衣机节电

洗衣机的耗电量取决于电动机的额定功率和使用时间的长短。电动机的功率是固定的，所以恰当地减少洗涤时间，就能节约用电。洗涤时间的长短，要根据衣物的种类和脏污程度决定。一般洗涤丝绸等精细衣物的时间可短些，洗涤棉、麻等粗厚织物的时间可稍长些。如果用洗衣机漂洗，可以先把衣物上的肥皂水或洗衣粉泡沫拧干，再进行漂洗，既可以节约用电，也减少了漂洗次数，从而达到节电的目的。

(5) 电风扇节电

一般扇叶大的电风扇，电功率就大，消耗的电能也多。同一台电风扇的最快挡与最慢挡的耗电量相差约 40%，在快挡上使用 1h 的耗电量可在慢挡上使用将近 2h。所以，常用慢速度，可减少电风扇的耗电量。

第五节　安全用电与建筑防雷

随着我国经济的迅速发展，电能的应用日益广泛。各种家用电器和办公自动化设备在给人们带来方便、快捷的同时，频繁发生的用电事故也给人们的生命财产带来极大的危害。只有了解安全用电常识，掌握安全用电操作，这样在电器设备的安装和使用过程中，才能可靠地防止电器事故的发生。

一、什么是触电

所谓触电，就是人体直接或间接触及电气线路或电气设备的带电部分，有电流通过人体构成回路，使人身受到不同程度伤害的电气事故。

在多种类型的触电事故中，最为严重的是电击。电击就是电流通过人的身体内部，使组织细胞受到破坏，引起心脏、呼吸系统以及神经系统麻痹。严重的电击将会直接危及人的生命。

除了电击之外，还有电伤。电伤一般发生在带电拉闸和负载短路的情况。当负载电流很大且为感性负载时，带载切断电源会使闸刀触头产生很大的电弧，若未加灭弧装置或灭弧装置的性能不好，会使触头熔化形成金属蒸气，喷到操作人员的手上或脸上造成电伤。

二、触电的危险

触电总是威胁着触电者的生命安全，其危险程度和下列因素有关：

1. 通过人体的电流

概括地说，通过人体的电流越大，触电对人身造成的危害性越大。那么，不同大小的电流通过人体时会产生什么样的效应呢？微弱的电流通过人体，不会使人有所感觉。人体开始有触电感觉的电流强度称为“感知电流”。不同的人有不同的感知电流，大约在0.5mA～1mA之间。女性比男性对电流更为敏感，感知电流比男性低约30%。

触电以后，人在主观意识上能够自主摆脱电源的最大电流，称为“摆脱电流”。当然，不同的人也有不同的摆脱电流，成年男性的摆脱电流在9mA左右，成年女性则为6mA左右。电流达到20mA就会使人的肌肉收缩，呼吸困难；电流达到50mA就会引起心室纤维性颤动，导致体内供血中断，有发生死亡的危险。能够在较短的时间内导致死亡的最小电流，称为“致命电流”。显然，超过50mA的电流，是触电致死的主要原因。因此，一般认为，引起心室颤动的电流就是致命电流。

当有200mA～1000mA的电流较长时间通过人体时，就会产生烧的效应。

电流对人体的作用特征如表7-1所列。

表7-1　电流对人体的作用特征

电流/mA	作用特征	
	50Hz～60Hz交流	直　流
0.6～1.5	开始有感觉	无感觉
2～3	手指强烈颤抖	无感觉
5～7	手部痉挛	感觉痒和热
8～10	手已难于摆脱电极，但还能摆脱，手指尖到手腕剧痛	热感觉增强
20～25	手迅速麻痹，不能摆脱电极，剧痛，呼吸困难	热感觉大大增强，手部肌肉不强烈收缩
50～80	呼吸麻痹，心房开始震颤	强烈的热感觉，手部肌肉收缩、痉挛，呼吸困难
90～100	呼吸麻痹，延续3s就会造成心脏麻痹	呼吸麻痹
300以上	作用0.1s以上时，呼吸和心脏麻痹	—
注：表中数据是从触电事故的统计资料分析得来的		

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2. 通过人体的电压

从人身触电时的导电回路来看，人体相当于一个电阻。根据欧姆定律，如果有电压作用于人体，就会产生电流。电压越高，流过人体的电流越大，对人身的损害也越严重。

家庭用电的电源大多取自电网，一般都是 220V/50Hz 的交流电，若人体电阻为 1000Ω，可以算出流过人体的电流为 220mA，只要电流持续时间超过 1s，就会出现生命危险。所以，在家庭中造成人身触电伤害的主要是市电 220V 交流电压。电子技术人员在检修电子设备时可能会接触到比 220V 高得多的电压，例如高压电容放电（已脱离电源的电视机高压放电等），由于不是持续高压，且能量很小，一般不会导致生命危险。

当作用于人体的电压低于一定数值时，就不会对人体组织和器官造成任何损害。这个电压称为“安全电压”。我国规定，低于 36V 的电压为安全电压；如果完全干燥，环境工作条件较好，那么 36V 工频交流电压作用于人体也不会造成任何损害。在环境恶劣、空间狭窄、相对湿度较大的工作场所，应该选择 12V 甚至 6V 的安全电压。

3. 电流作用时间的长短

电流通过人体的时间长短，与对于人体的伤害程度有着密切的关系。人体处于电流作用下，时间愈短，获救的可能性越大；时间愈长，电流对人体的机能破坏越大，获救的可能性也就越小。

4. 频率的高低

一般来说，工频 50Hz～60Hz 对人体是最危险的。从电击观点来看，高频率（500kHz 以上）对人体是较为安全的，但高频率电流灼伤的危险性并不比直流电压和工频的交流电危险性小。此外，无线电设备、淬火、烘干和熔炼的高频电气设备，能辐射出波长 lcm～5cm 的电磁波。这种电磁波能引起人体体温增高、身体疲乏、全身无力和头痛失眠等症状。

5. 电流通过人体的途径

电流通过人体时，可使表皮灼伤，并能刺激神经，破坏心脏及呼吸器官的机能。电流通过人体的路径，如果是从手到脚，或从手到手，中间经过重要器官（心脏）时最为危险；如果是从脚到脚，则危险性较小。

6. 人体的电阻

当人体接触带电体时，人体就被当作一电路元件接入回路，如上所述，在同样电压的作用下，人体的电阻不同，通过人身的电流大小也各不相同。

人体电阻包括体内电阻和皮肤电阻两部分。体内电阻相对来说比较稳定，皮肤电阻受多种因素影响，变化范围很大。

一般认为，一只手臂或一条腿的电阻大约为 500Ω。因此，由一只手臂到另一只手臂或由一条腿到另一条腿的通路相当于一只 1000Ω 的电阻。假定一个人用双手握紧一带电体，双脚站在水坑里而形成导电回路，这时人体电阻基本上就是体内电阻，约为 500Ω。一般情况下，人体电阻可按 1000Ω～2000Ω 考虑。

影响人体电阻的因素主要有：皮肤角质层的厚度和完好程度，是否潮湿，皮肤接触带电体的面积和接触压力等。若皮肤多汗、潮湿、带有导电粉尘、接触面积和压力大，人体电阻都会显著降低。在不同的环境和工作条件下，人体电阻的参考数据如表 7-2 所列。

表 7-2　人体电阻

接触电压/V	人体电阻/kΩ		
	皮肤干燥	皮肤潮湿	浸入水中
10	7	3.5	0.6
50	4	2	0.4
100	3	1.5	0.35
250	1.5	1	0.3

从表 7-2 中可以看出，皮肤的干湿程度与接触电压不同，人体电阻存在着很大的差异。

7. 触电者的体质状况和皮肤的干湿程度

人体是导电的，当触电后电压加到人体上时，就将有电流通过。这个电流与人体体质和当时皮肤的干湿程度有关。当皮肤潮湿时电阻就小，皮肤擦破时电阻更小，则通过的电流就大，触电时的危险程度也就增大。

必须指出，在同样的条件下，人的身体状况不同，危险性也会有明显差异。体弱、行动不便、患有心脏病的触电者，受到的伤害会更大；儿童的摆脱电流低，所以触电的危险性比成人要大得多。

阅读材料：触电的人是被电“吸住”了吗

常听人们有这种说法：触电时人被电吸住了，抽不开。实际上这个说法是错误的。我们知道，不论是否存在电流，在一般情况下，导线中、电器中的正、负电荷的电量是相等的，对外的静电作用是相互抵消的。即使局部地方偶尔出现少许正、负电荷不相等，其静电引力也是微不足道的。如若不然，就会出现下列奇特现象：用手去移动台灯引线，即使不被“吸住”，至少也会明显感到这种“吸力”，高压电压会“吸住”大量尘土从而形成粗大的尘土柱。事实上，这些现象都没出现。

但是人手触电时，为什么有时不能把手抽回来？对这一提问，可用电流的生理效应来解释。

人手触电时，由于电流的刺激，手会由痉挛到麻痹，即使大脑发出抽回手的指令，无奈手已无法执行这一指令了。调查表明，绝大多数触电死亡者，都是手的掌心或手指与掌心的同侧部位触电。刚触电时，手因条件反射而弯曲，而弯曲的方向恰使手不自觉地握住了导线，这样，加长了触电时间，手很快地痉挛以致麻痹。这时即使想松开手指、抽回手臂，已不可能，形似被“吸住”了。如若触电时间再长一点，人的中枢神经都已麻痹，此时更不会抽手了，这些过程都是在较短的时间内发生的。

如是手的背面触电，对一般的民用电，则不容易导致死亡。有经验的电工为了判断用电器是否漏电而手边又无电笔时，有时就用食指指甲去轻触用电器外壳，若漏电，则食指将因条件反射而弯曲，弯曲的方向恰是脱离用电器的方向。这样，触电时间很短，不致有危险，当然，在电压很高的情况下，这样做也会发生危险。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

三、人体触电的几种形式

人体触电主要有以下几种形式。

1. 单相触电和两相触电

(1)单相触电

人体的一部分与一根带电相线接触，另一部分又同时与大地(或零线)接触而造成的触电称为单相触电，单相触电是最多的一种触电事故。以下几种情况都是单相触电：

① 火线的绝缘皮破坏，其裸露处直接接触了人体，或接触了其他导体，间接接触了人体。

② 潮湿的空气导电、不纯的水导电，如湿手触开关或浴室触电。

③ 家用电器外壳未按要求接地，其内部火线外皮破损接触了外壳，或家用电器漏电，使外壳带电。

④ 人站在绝缘物体上一只手触摸火线，却用另一只手扶墙或其他接地导体，或站在地上的人扶他。

⑤ 人站在木桌、木椅上触摸火线，而木桌、木椅却因潮湿等原因转化成为导体。

(2)两相触电

人体的不同部位同时接触两根带电相线时的触电。这种触电的电压高，危险性大。单相和两相触电如图 7-12 所示。

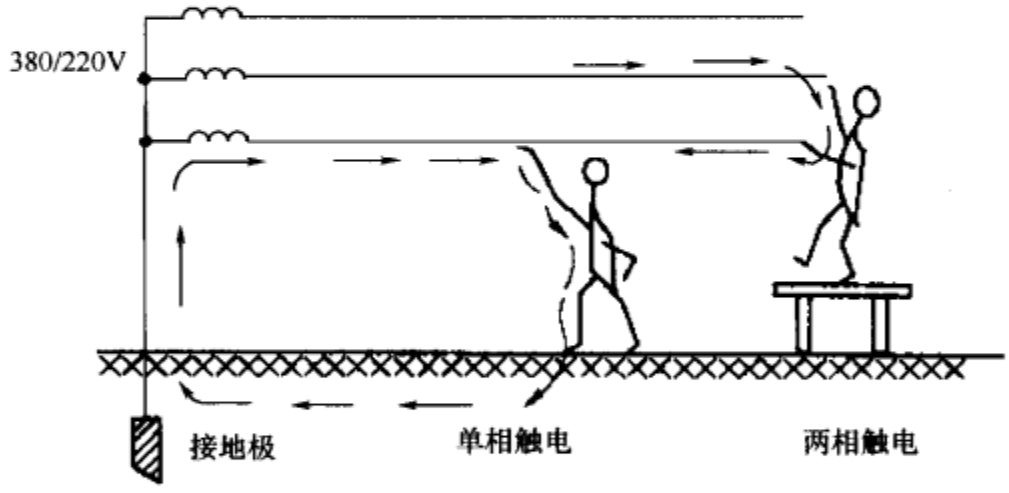


图 7-12　单相和两相触电

2. 高压触电

高压带电体不但不能接触，而且不能靠近．高压触电有以下两种。

(1)电弧触电

人与高压带电体相距一定距离，高压带电体与人体之间会发生放电现象，导致触电。

(2)跨步电压触电

电力线落地后会在导线周围形成一个电场，电位的分布是以接地点为圆心逐步降低。当有人跨入这个区域时，两脚之间的电位差会使人触电，这个电压称为跨步电压，如图 7-13 所示。通常高压线形成的跨步电压对人有较大危险。如果误入接地点附近，应采取双脚并拢或单脚跳出危险区，一般在 20m 以外，跨步电压就降为 0 了。

高压触电的危险比 220V 电压的触电更危险，所以看到“高压危险”的标志时，一定不

能靠近它，室外天线必须远离高压线，不能在高压线附近放风筝、捉蜻蜓、钓鱼、爬电杆等。

四、保护接地与保护接零

在人们的日常生活中，使用着多种多样的家用电器，如电视机、电冰箱、洗衣机、电风扇、微波炉等，它们都是直接由 220V 市电作为电源。这些电器的金属外壳平时是不带电的，但是在使用中由于导体绝缘破损、严重受潮或其他原因，外壳有可能带电并出现危险的对地电压，人体一旦触及，就会发生触电事故。为了保障人身安全，供电系统采取了可靠的保安措施，应用最为普遍的就是保护接地和保护接零。

1. 保护接地

图 7-14 是三相电源中性点不接地系统的示意图。虽然供电线路与大地没有直接相连，但线路导线与大地之间却存在着电容效应，这个等效电容叫做分布电容。供电线路越长，分布电容越大，对工频(50Hz)产生的容抗越小。由图可见，当电器发生漏电时，电流将通过人体、大地、分布电容构成回路，造成人身触电事故。

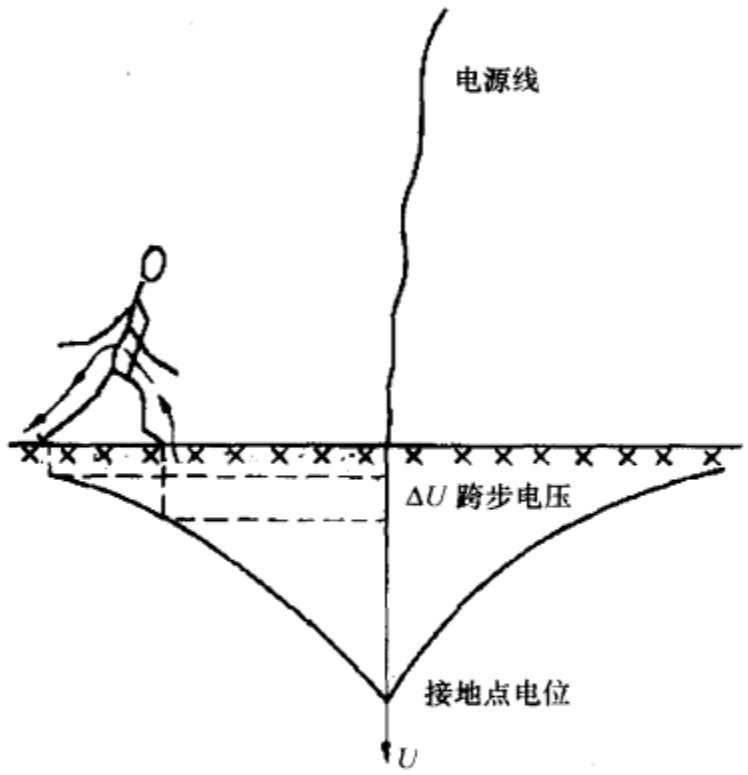


图 7-13　跨步电压触电

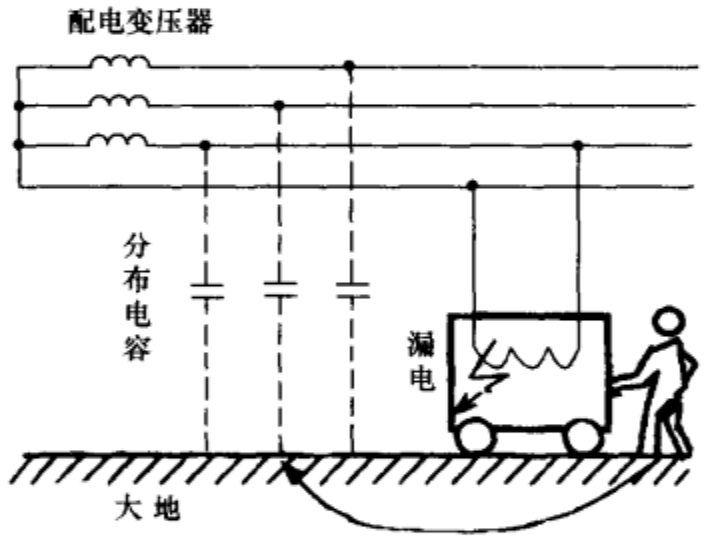


图 7-14　三相电源中性点不接地系统的示意图

若将电器的金属外壳通过接地导线和接地体与大地进行可靠连接，如图 7-15 所示，在发生触电时，人体电阻 R_r 将与接地电阻 R_d 并联，人体电阻在较低时约为 1000Ω，而合格的接地装置的接地电阻应低于 4Ω，显然 $R_r \gg R_d$，漏电电流的绝大部分将从接地电阻 R_d 上分流而过，通过人体的电流会远远小于安全电流值，从而保障了人身安全。这种保安措施，称为保护接地。

接地装置由接地体和接地线两部分组成，人工接地体通常采用钢管或角钢打入地下 4m 以上，接地线用扁钢或圆钢与接地体电焊连接。

需要强调的是，保护接地仅适于中性点不接地电网。

2. 保护接零

目前，在大多数三相四线制供电系统中，三相电源(发电机、配电变压器)的中性点都是通过接地导线和接地体与大地进行可靠的连接。此时，电气设备的金属外壳并不直接

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

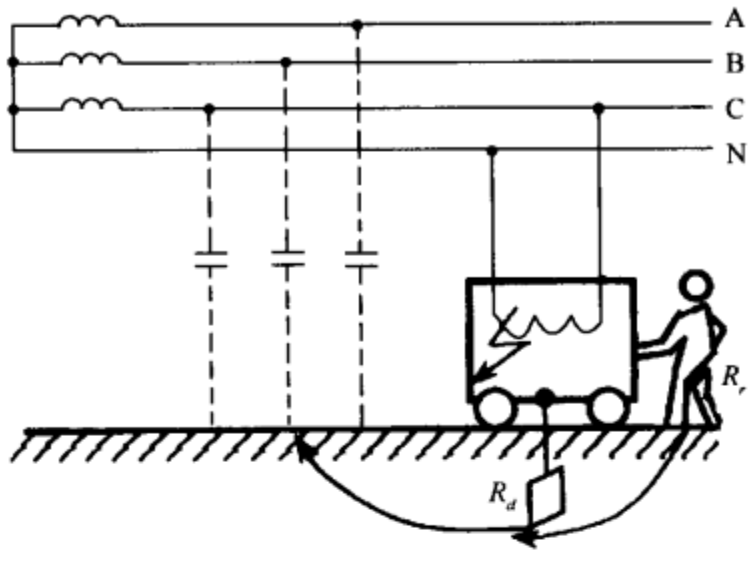


图 7-15　保护接地

接地，而是连接在零线上，如图 7-16 所示。这种保安措施，称为保护接零。

由图可见，当电器发生漏电时，相线通过漏电的金属外壳与零线相通构成回路。由于这一回路的电阻很小，漏电电流很大，会使接在相线上的熔断丝 FU 熔断或引起自动开关跳闸，及时切断故障设备的电源，保护了人身安全。

在保护接零系统中，一旦零线断开，不但不能起到触电保安作用，而且在三相负载不平衡时，还会引起各相电压不相等：有的低于 220V，使负载不能正常工作；有的高于 220V，会将这一相所接的电器烧毁，造成“群爆”事故。为此，在供电系统中采取了多点重复接地措施，如图 7-17 所示。

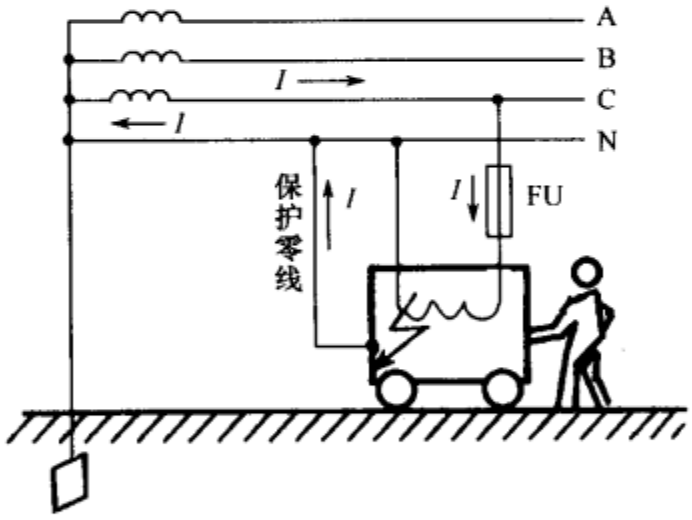


图 7-16　保护接零

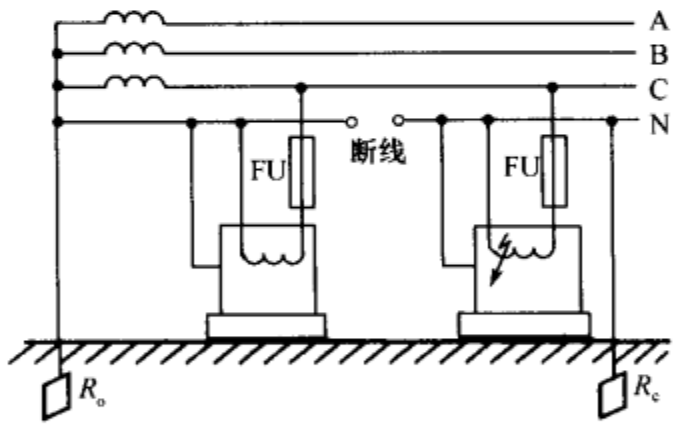


图 7-17　多点接地

在正常情况下，重复接地电阻 R_c 与中性点接地电阻 R_0 并联，使接零系统的电阻减小，进一步提高了保护能力；在零线断开时，故障电流又会通过重复接地电阻 R_c 构成回路，使熔断丝及时熔断，起到漏电保护作用。

采用保护接零的家用电器，需要注意以下几点：

① 零线上不允许装设开关和保险丝。

② 用户自己接装单相三孔插座时，应按图 7-18(a)进行接线，即：面对插座，左边应接工作零线 N，右边接相线 L，上边是保护零线 E。保护零线必须单独接在零线干线上，绝不允许在插座内将保护零线 E 与工作零线 N 短接。

③ 安装电器的单相三极插头时，必须使用三芯软线，将电器的金属外壳接在插头的

上部 E 端，相线接 L 端，工作零线接在 N 端，如图 7-18(b)所示。

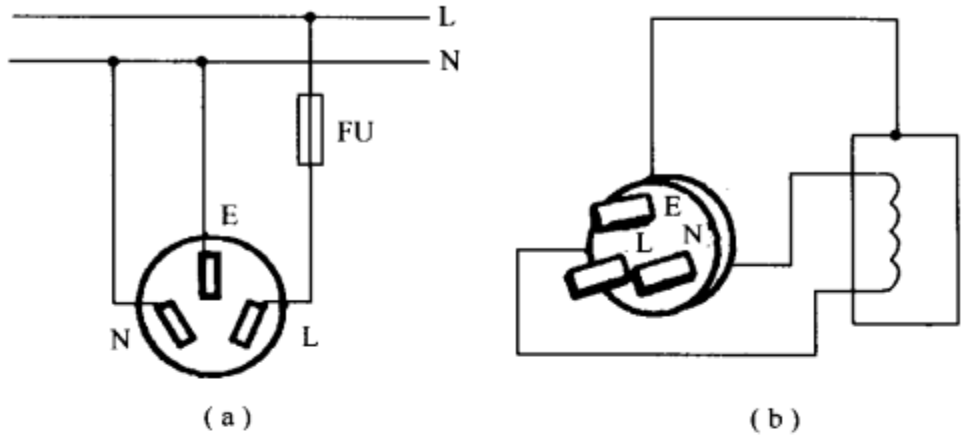


图 7-18　单相三孔插座与插头

3. 保护接地与保护接零的选择

在中性点不接地的三相交流电源中，只能采用保护接地的措施。这种保护的原理在于漏电压几乎都将分布在电源对地的分布电容上，使得机壳与地之间的漏电压极小。

在中性点接地的三相交流电如低压配电线路中，如果采用保护接地措施，当发生绝缘损坏并使机壳带电时，两地之间会有短路电流通过，如图 7-19 所示。其短路电流为：

$$I_{地}=\frac{220}{4\times 2}=27.5\text{A}$$

由于这个短路电流不够大，可能不会使熔断器熔断。尽管保护接地电阻只有 4Ω，但该电流还是会在地与机壳之间形成 110V 高压电，如果人体触及就会酿成触电事故。因此，必须采用保护接零措施。

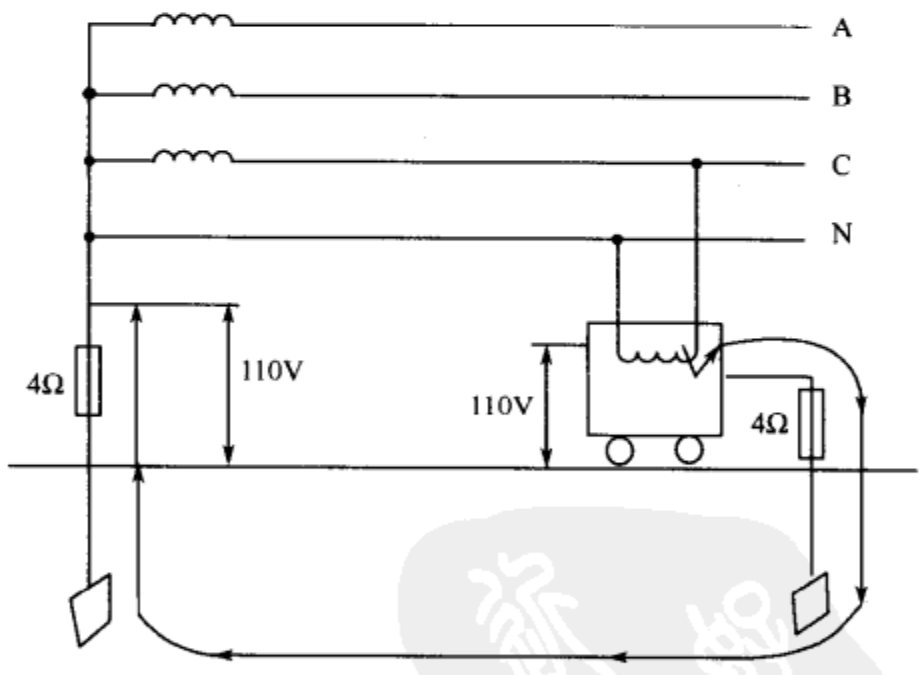


图 7-19　中性点接地的三相电路不能采用保护接地

必须指出的是，在同一个配电系统中不允许保护接零与保护接地混合使用。因为当接地处设备的外壳碰线时，则该设备的外壳与相邻接零设备的外壳之间具有相电压 U_p 的电位差，如图 7-20 所示。当保护接地设备发生单相碰壳短路时，将使零线电位升高，使接零保护的电器外壳带很高的电压，人若同时接触这两台设备的外壳，将承受很高的相电压，这是非常危险的。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

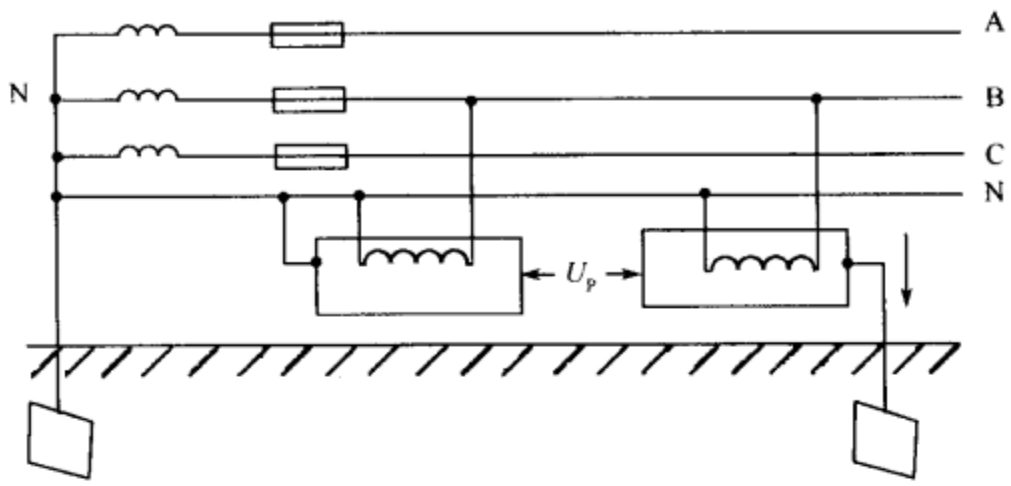


图 7-20　保护接零与保护接地不能混合使用

五、触电事故的规律和预防

1. 触电事故的规律

① 有明显的季节性。一般每年以二、三季度事故较多，六月至九月最集中。因为夏秋两季天气潮湿、多雨，降低了电气设备的绝缘性能；人体多汗，皮肤电阻降低，容易导电；天气炎热，电扇用电或临时线路增多，且操作人员不穿工作服和不戴绝缘护具。

② 低压触电多于高压触电。这是因为低压设备多、电网广，与人接触机会多；低压设备简陋而且管理不严，容易使人思想麻痹，多数人缺乏电气安全知识。

③ 农村触电事故多于城市。主要是由于农村用电条件差，设备简陋，技术水平低，管理不严。

④ 青年和中年触电多。一方面是因为中青年多数是主要操作者；另一方面因这些人多数已有几年工龄，不再如初学时那么小心谨慎。

⑤ 单相触电事故多，占 70%以上。

⑥ 事故点多在电气连接部位。

2. 触电事故的预防

① 照明用电的火线与零线之间的电压是 220V，绝不能同时接触火线与零线。零线是接地的，所以火线与大地之间的电压也是 220V，一定不能在与大地连通的情况下接触火线。

② 开关要接在火线上，避免打开开关时使零线与接地点断开。

③ 安装螺口灯的灯口时，火线接中心、零线接外皮。

④ 室内电线不要与其他金属导体接触；不在电线上晾衣物、挂物品；电线有老化与破损时，要及时修复。

⑤ 不用湿手扳开关、换灯泡，插、拔插头。

⑥ 不站在潮湿的桌椅上接触火线。

⑦ 接触电线前，先把总电闸拉开，在不得不带电操作时，要注意与地绝缘，先用测电笔检测接触处是否与火线连通，并尽可能单手操作。

⑧ 各种家用电器的金属外壳，必须加装良好的接零保护。

⑨ 随时检查电器内部电路与外壳间的绝缘电阻，凡是绝缘电阻不符合要求的，应立即停止使用。电器使用前要仔细察看电源线及插头。

⑩室内线路及临时线路的截面积应符合要求，使用的导线种类及敷设工艺应符合规范要求。

⑪各种电器设备的安装必须按照规定的高度和距离施工，火线与零线的接线位置要符合用电规范。

⑫刀闸开关的电源进线必须接静触头，保证拉闸后线路不带电。刀闸开关需垂直安装，并使静触头在上方，以免拉闸后自动闭合造成意外。

⑬低压电路应采取停电检修安全工作方式，检修前在相线上装好临时接地线，或在拉闸处挂上警告牌，或是拔去熔丝上盖并随身带走，防止误合闸。在操作时，应视同带电操作。

阅读材料：漏电保护器

目前，新建的居民楼，在每套住宅的配电箱中电度表的后面（负荷侧）都装设了带有漏电保护器的自动开关，取消了传统的瓷闸盒和熔断丝。这种新型的自动开关，除了能方便地通过手动接通和切断电源外，还具有漏电保护、短路保护、过载保护和欠压保护等功能。其中，漏电保护器是一种最为有效的防止触电事故的电气保安装置。一旦家用电器或线路出现漏电，只要人体接触带电部分，漏电保护器就会在极短的时间内切断电源，避免人身受到电击的伤害。

漏电保护器的种类很多，家庭中广泛采用的是零序电流型漏电保护器，它又可分为电磁式和电子式两种。

图 7-21 是电磁式漏电保护器的原理电路。漏电保护器的核心部件是零序电流互感器（以下简称互感器），互感器相当于一个变压器，也是利用电磁感应原理工作的，它是在高磁导率的磁环上绕制升压线圈 L_1，作为次级（副边），将用电设备的电源线（相线和零线）直接穿过互感器的环形磁心，作为初级（原边）。升压线圈 L_1 接在漏电脱扣器上。当用电设备正常工作无漏电发生时，流过相线和零线的电流大小相等、方向相反，两根电源线中的电流在互感器中产生的磁场互相抵消，互感器副边线圈 L_1 中不会产生感应电动势，与之相连的漏电脱扣器不动作。当家用电器出现漏电或人体接触相线时，将有电流 I_0 通过人体流入大地，这时，$I_1 = I_2 + I_0$，$I_1 - I_2 = I_0 \neq 0$，在零序电流互感器中就产生了磁场，升压线圈 L_1 中就有感应电压输出加在漏电脱扣器上，使自动开关 S 断路，切断供电电源，避免了电流对人身造成伤害。漏电保护器都设有漏电模拟试验装置，用来检验漏电保护器动作是否可靠。图中，由按钮开关 SB 与限流电阻 R 构成漏电模拟电路，跨接在 220V 电源线上，并穿过互感器。当按下试验按钮 SB 时，由限流电阻 R 的阻值确定的模拟触电电流（约 40mA），在互感器中产生磁场，L_1 中将产生感应电压，使脱扣器动作而切断电源。

电子式漏电保护器是以晶体管放大器作为中间机构，将零序电流互感器输出的漏电信号进行放大，触发单向晶闸管导通，接通电源主开关的电磁脱扣机构，及时断开电源，起到漏电保护作用。近年来，高灵敏度漏电保护器专用集成电路（如 SF54123）已经逐渐应用于漏电保护装置（如 DZL18-20 型漏电保护器），使漏电保护器结构简化、体积缩小、性能可靠、灵敏度高，成为漏电保护器的发展方向。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

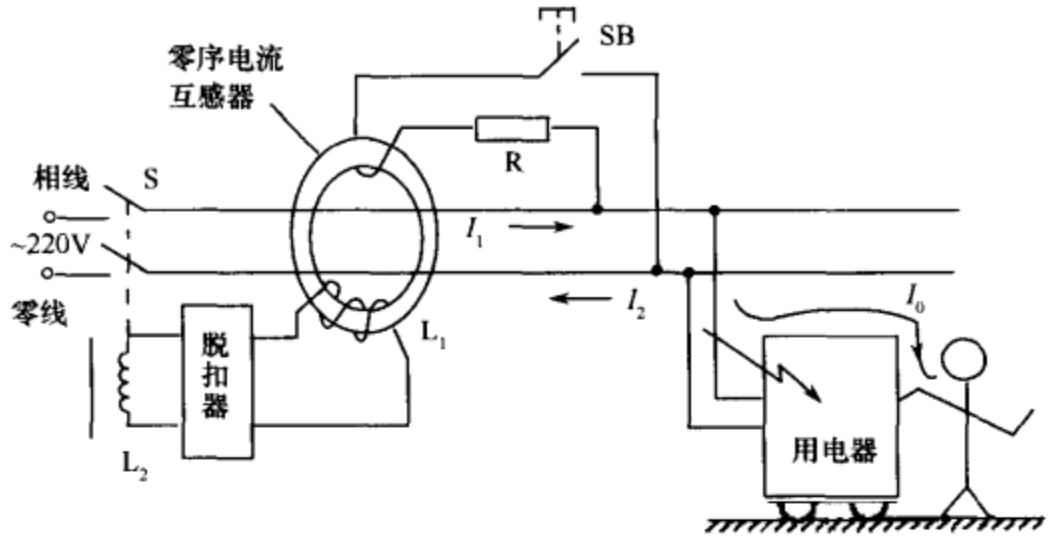


图 7-21　电磁式漏电保护器的工作原理

六、建筑防雷

雷电是自然界中的放电现象，雷击的发生可能伤害人类、建筑物及其内部设备，因此应了解雷电的形成，采取适当的防雷措施，以保护人身安全，使建筑物免遭雷击。

1. 雷电形成

雷是一种大气放电的现象，它是由带有不同电荷的云层放电而产生的。在放电过程中产生强烈的电光(闪电)和巨响(雷鸣)，同时还将产生强大的电压和电流，雷电压可高达几十万伏～几百万伏，雷电流可高达几千安。时间虽短，但足以使建筑物和电气设备受到破坏。

2. 防雷措施

目前在电气设备和电气线路上常用的防雷方法有：用避雷针和避雷线防止直击雷(雷云与带异性电荷的建筑物之间的放电)危害；用各种不同形式的避雷器和放电间隙防止感应雷的危害。

重点提示：感应雷

感应分静电感应和电磁感应两种。

静电感应：由于雷云在建筑物的顶部感应了大量异性电荷，雷云放电后，顶部的电荷顿时失去束缚，对地呈现高电压。

电磁感应：雷击时巨大的雷电流在周围空间产生的强大电磁场，这种电磁场也会在附近的金属导体上感应出很高电压。

(1)避雷针

避雷针一般应用在各种电气设备、变电所、高大建筑物和烟囱上。其原理是将云中电荷引到金属针上并安全导入地中，故而，可形象地称之为“引雷针”。

避雷针有三部分组成：一是接闪器(针头)。它是避雷针的最高部分，专门用来接受雷电，一般可用直径为 10mm～12mm、长 1m～2m 的钢棒。二是接地引下线，或称引下线或接地线。它将接闪器的雷电流引到接地装置。引下线一般可用镀锌钢绞线、圆钢或扁钢制成。它应保证雷电流通过时不熔化，可用直径不小于 6mm 的圆钢或截面不小于 $25mm^2$ 的镀锌钢绞线。三是接地装置。它是避雷针的地下部分，埋地深度为 0.6m～0.8m。接地装置可用圆钢、角钢、钢管和扁钢焊接而成。

(2)避雷线

避雷线一般用在35kV以上的高压输电线上，一般架设在电力线之上，在电杆处用引下线与接地装置连接引到大地中。原理是避雷线高于导线，首先被雷电击中，将雷电流导入大地。

(3)避雷器

避雷器一般应用在设备的防护上。其作用是防止设备受到雷波、雷电的电磁作用而产生感应过电压，主要结构是放电间隙。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

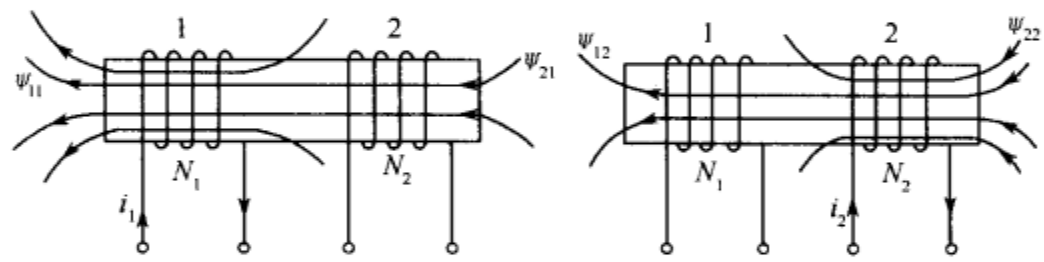
第八章　互感和变压器

变压器是一种常见的电气设备，在电力系统和电子线路中得到了广泛的应用。本章主要讨论互感现象和变压器的原理，并对常用变压器进行介绍。

第一节　互　感

一、互感现象

如图 8-1(a)是两个靠得很近的线圈，当第一个线圈中通有电流 i_1 时，在线圈中产生自感磁链 Ψ_{11}，根据右手螺旋定则，可以确定 Ψ_{11} 方向；第一个线圈产生的磁链还有一部分要通过第二个线圈，这一部分磁链叫做互感磁链 Ψ_{21}。同样，在图 8-1(b)中，当第二个线圈通有电流 i_2 时，它所产生的磁链 Ψ_{22} 也会有一部分通过第一个线圈，产生互感磁链 Ψ_{12}。这种互相感应的现象叫做互感现象。



(a)　　(b)

图 8-1　互感现象

重点提示：磁链当线圈流过电流时，在线圈中产生磁通 Φ，若线圈的匝数为 N，且通过每匝的磁通量均为 Φ，则通过线圈的磁链 $\Psi=N\Phi$。

二、互感系数

在图 8-1 中，互感磁链与产生该磁链的电流比值叫做这两个线圈的互感系数，用符号 M 表示，即

$$M=\frac{\Psi_{21}}{i_1}=\frac{\Psi_{12}}{i_2}$$

由上式可知，两个线圈中，当其中一个线圈通有 1A 电流时，在另一线圈中产生的互感磁链数，就是这两个线圈之间的互感系数。互感系数的单位和自感系数一样，也是亨(H)。

通常互感系数只和这两个回路的结构、相互位置及介质的磁导率有关，而与回路中的电流无关。只有当介质为铁磁性材料时，互感系数才与电流有关。

设 L_1、L_2 分别为两个线圈的电感，则互感系数 M 为：

$$M=K\sqrt{L_1L_2} \tag{8-1}$$

式中：K 为线圈的耦合系数，表示线圈的耦合程度，K 的值在 0 和 1 之间。当 $K=0$ 时，说明线圈产生的磁通互不耦合，因此，不存在互感；当 $K=1$ 时，说明两个线圈耦合得最紧，一个线圈产生的磁通全部与另一个线圈相耦合，产生的互感最大，这时又称为全耦合。

三、互感电动势

在图 8-1 所示图中，如果 i_1 随时间变化，则 Ψ_{21} 也随时间变化，根据法拉第电磁感应定律，第二个线圈将要产生感应电动势，这种因互感现象而产生的电动势称为互感电动势，互感电动势的大小为：

$$e_{21}=\frac{\Delta\Psi_{21}}{\Delta t} \tag{8-2}$$

同理，当 i_2 随时间变化时，也要在第一个线圈中产生互感电动势，互感电动势的大小为：

$$e_{12}=\frac{\Delta\Psi_{12}}{\Delta t} \tag{8-3}$$

根据 $M=\frac{\Psi_{21}}{i_1}=\frac{\Psi_{12}}{i_2}$ 可知，$\Psi_{21}=Mi_1$，$\Psi_{12}=Mi_2$，把它代入式(8-2)和式(8-3)得：

$$e_{21}=\frac{\Delta\Psi_{21}}{\Delta t}=M\frac{\Delta i_1}{\Delta t} \tag{8-4}$$

同理，当 i_2 随时间变化时，也要在第一个线圈中产生互感电动势，互感电动势的大小为：

$$e_{12}=\frac{\Delta\Psi_{12}}{\Delta t}=M\frac{\Delta i_2}{\Delta t} \tag{8-5}$$

式(8-4)和式(8-5)说明，线圈中的互感电动势，与互感系数和另一线圈中电流的变化率的乘积成正比。互感电动势的方向，可用楞次定律判定。

互感现象在电工和电子技术中应用非常广泛，如电源变压器、电流互感器、电压互感器等都是根据互感原理工作的。

互感有时也会带来害处。例如，有线电话常常会由于两路电话间互感而引起串音。无线电设备中，若线圈位置安放不当，线圈间相互干扰，会影响设备正常工作。在这种情况下，就要设法避免互感的干扰。

四、互感线圈的同名端及其判断方法

1. 互感线圈的同名端

两个或两个以上线圈彼此耦合时，常常需要知道互感电动势的极性。例如，电力变压器中，用规定好的字母标出原/副线圈间的极性关系。在电子技术中，互感线圈应用十分广泛，但是必须考虑线圈的极性，不能接错。例如，收音机的本机振荡电路，如果把互感线圈的极性接错，电路将不能起振。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

为了工作方便，电路图中常用小圆点“·”标出互感线圈的“同名端”，以反映出互感线圈的极性。

2. 同名端的判定方法

如果知道线圈的绕向，可以根据楞次定律进行判定，下面以图 8-2 所示互感线圈进行说明。

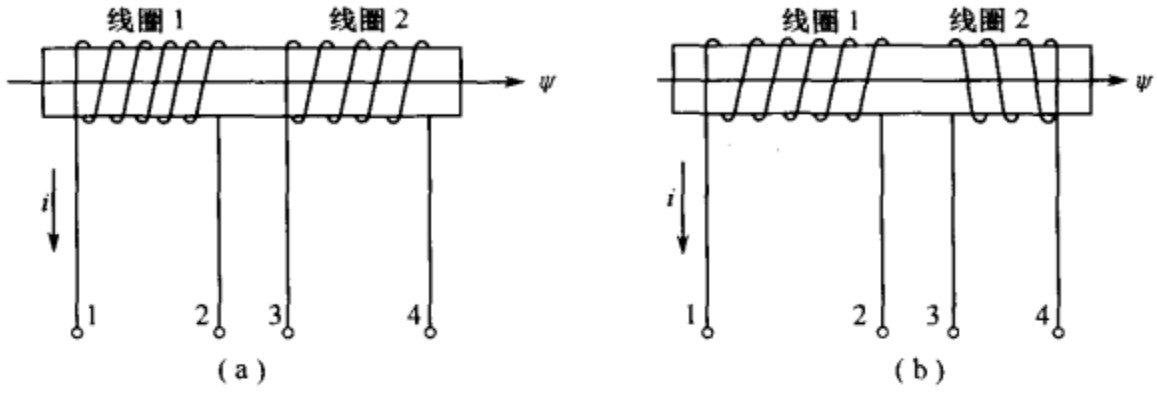


图 8-2　互感线圈

当线圈 1 通有电流 i 并且电流随着时间增加时，电流 i 所产生的自感磁通和互感磁通也随时间增加。由于磁通的变化，线圈 1 中要产生自感电动势，线圈 2 中要产生互感电动势。

由于原电流 i 在增大时，反电动势要阻碍这一电流的增大，这样可画出反向电动势产生的反向电流方向 $i_{反}$ 为自 1 向 2，与原电流 i 的方向相反。反向电动势产生在线圈 1 的两端，根据内电路中电流是从负极流向正极的原理，可画出线圈 1 两端电动势的正负极性，即 2 端为正，1 端为负。对于线圈 2，当电流 i 增大时，由于互感的作用，使通过线圈 2 的磁通增加，根据楞次定律，可判断出互感电流 $i_{互}$ 的方向如图 8-3(a)所示，根据内电路中电流是从负极流向正极的原理，可画出线圈 2 两端电动势的正负极性，即 4 端为正，3 端为负。可见，1 与 3、2 与 4 的极性相同。用同样的方法，可画出图 8-2(b)自感电动势和互感电动势的方向，如图 8-3(b)所示。

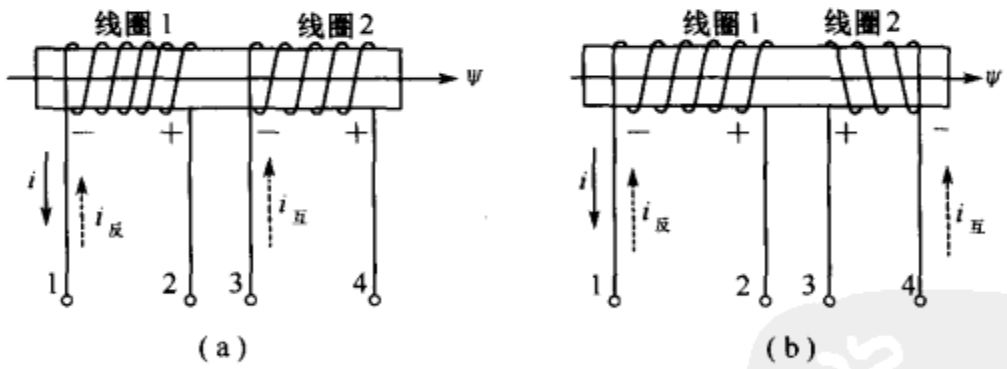


图 8-3　互感线圈的同名端

如果电流 i 不是增大而是减小，那么各个端点的正、负极性都要变，不管电流 i 怎样变化，图 8-2(a)中的 1 与 3 和图 8-2(b)中的 1 与 4 的电动势的极性始终保持一致。

互感线圈中，感应电动势极性始终保持一致的端点，叫做同名端，反之叫做异名端。在图 8-2(a)中，1 与 3、2 与 4 是同名端；1 与 4、2 与 3 是异名端。在图 8-2(b)中，1 与 4、2 与 3 是同名端；1 与 3、2 与 4 是异名端。

需要说明的是，同名端关系只取于两耦合线圈的结构(绕向和相对位置)，与电压、电流的设定没关系。一般在电路中具有互感的两个线圈的画法如图 8-4(a)、(b)所示。

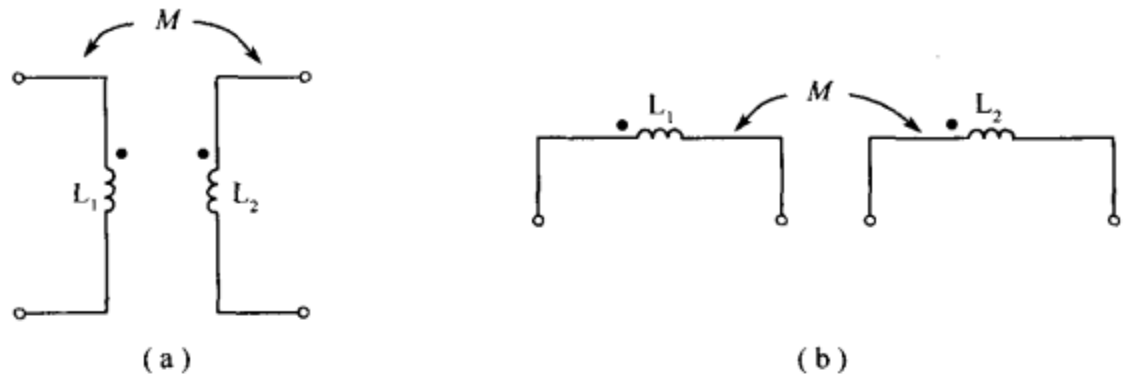


图 8-4　互感线圈同名端的表示方法

以上判定线圈同名端时，需知道线圈的绕向，但在很多情况下，如线圈经过浸漆或经过其他处理，从外观已无法知道两线圈的具体绕向，同名端也就无法看出，这时，就需要采用实验法了。下面以图 8-5 为例进行说明。

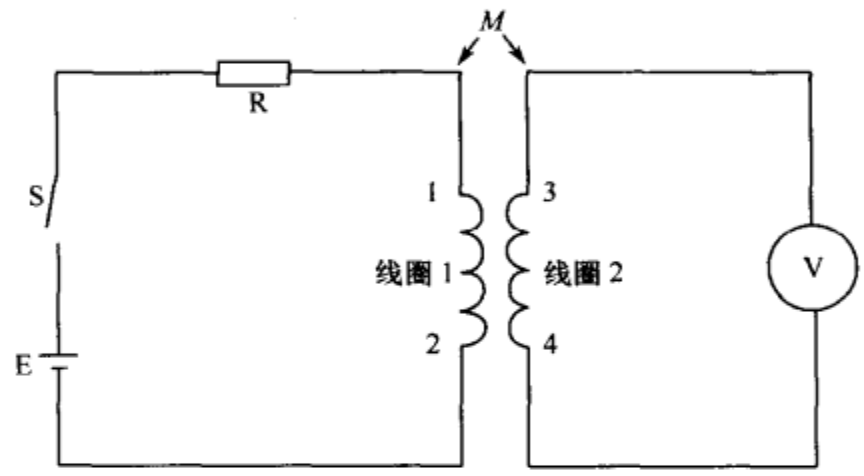


图 8-5　实验法

电路中，线圈 1 与电阻 R、开关 S 串联起来以后，接到直流电源 E 上，把线圈 2 的两端与电压表(或电流表)的两个接线柱连接，形成闭合回路。迅速闭合开关 S，电流从线圈 1 的 1 端流入，并且电流随时间的增大而增大，即$\frac{\Delta I}{\Delta t}>0$，如果此时电压表的指针向正刻度方向偏转，则线圈 1 的 1 端与线圈 2 的 3 端是同名端。反之，1 与 3 为异名端。

五、互感线圈的连接

1. 互感线圈的串联

把两个有互感的线圈串联起来，有两种不同的接法。异名端相接称为顺串，同名端相接称为反串。

(1)顺串

如图 8-6(a)所示，图中端点 1 与 3、端点 2 与 4 是同名端，将 2 和 3 连接在一起，这样的连接称为顺串。

设线圈 1 的自感系数(电感)为 L_1，线圈 2 的自感系数(电感)为 L_2，两线圈的互感系数为 M，顺串后的电感为 L，则有如下关系式：

$$L=L_1+L_2+2M \tag{8-6}$$

这就是说，当两个互感线圈顺串时，相当于一个具有等效电感 $L=L_1+L_2+2M$ 的电

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

感线圈。

(2)反串

如图 8-6(b)所示,图中端点 1 与 4、端点 2 与 3 是同名端,将 2 和 3 连接在一起,这样的连接称为反串。对于反串的两个线圈,有如下关系式:

$$L=L_1+L_2-2M \tag{8-7}$$

这就是说,当两个互感线圈反串时,相当于一个具有等效电感 $L=L_1+L_2-2M$ 的电感线圈。

在电子电路中,常常需要使用具有中心抽头的线圈,并且要求从中点分成两部分的线圈完全相同。为了满足这个要求,在实际绕制这种线圈时,可以用两根相同的漆包线平行地绕在同一芯子上,然后,再把两个线圈的异名端接在一起作为中心抽头。

若两个互感线圈的同名端接在一起,则两个线圈所产生的磁通在任何时候总是大小相等而方向相反,因此相互抵消,这样接成的线圈就不会有磁通穿过,因而就没有电感,它只起一个电阻的作用。所以,为了获得无感电阻,就可以在绕制电阻时,将电阻线对折,双线并绕。

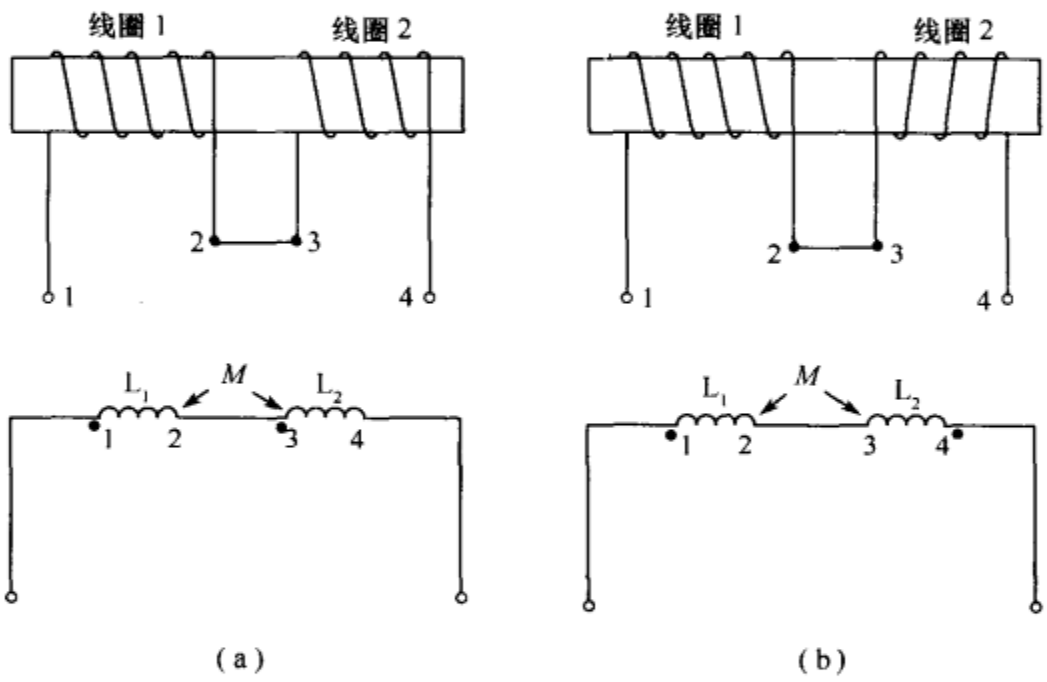


图 8-6　线圈的顺串与反串

重点提示:由上述可知,顺接时的等效电感大于反接时的等效电感。由于两线圈不论是顺接还是反接,其等效电感 $L\geqslant 0$,所以有:

$$L_1+L_2-2M\geqslant 0$$

即 $M\leqslant\frac{1}{2}(L_1+L_2)$

另外,根据两个互感线圈顺串和反串的特点,还可测出互感系数 M 的大小。

设顺向串联时的等效电感 $L'=L_1+L_2+2M$

反向串联时的等效电感 $L''=L_1+L_2-2M$

故互感系数为:$M=\frac{L'-L''}{4}$

2. 互感线圈的并联

两个互感线圈,设互感系数为 M,线圈的电感分别为 L_1 和 L_2,当它们并联时,也有两

种接法，即顺并和反并。

(1)顺并

对应的同名端并在一起叫顺并，如图 8-7(a)所示，若两个线圈顺并后的电感为 L，则有如下关系式：

$$L=\frac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2-2M} \tag{8-8}$$

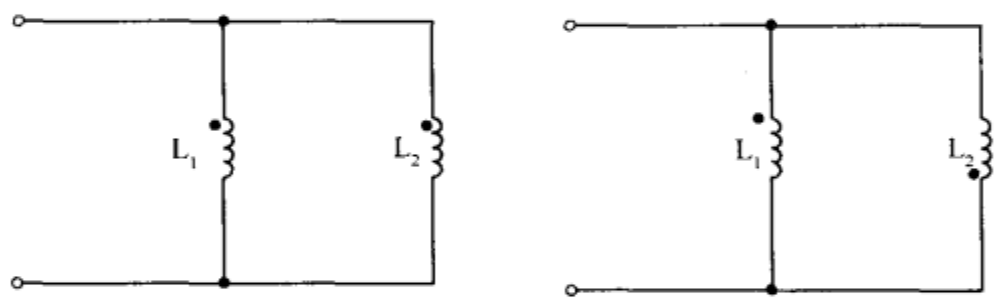
这就是说，当两个互感线圈顺并时，相当于一个具有等效电感 $L=\frac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2-2M}$的电感线圈。

(2)反并

对应的异名端并在一起叫反并，如图 8-7(b)所示，若两个线圈反并后的电感为 L，则有如下关系式：

$$L=\frac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2+2M} \tag{8-9}$$

这就是说，当两个互感线圈反并时，相当于一个具有等效电感 $L=\frac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2+2M}$的电感线圈。



(a)　　(b)

图 8-7　线圈的顺并与反并

阅读材料：行线性校正线圈的极性

彩电中的行线性校正电感在行扫描电路中具有重要作用，维修时若将行线性校正电感接反，会出现开机不久，电感温度迅速升高并烧坏的现象。为什么会出现这种现象呢？是不是说明行线性校正电感具有“极性”呢？下面对这一问题作一简要说明。

单从电感线圈来看，其本身是没有“极性”的。根据楞次定律，线圈无论怎样接入电路，当线圈中通以变化电流时，线圈中要产生自感电动势，自感电动势在电路中形成的电流总是阻碍原电流的变化。即当原电流增加时，自感电动势产生的电流方向和原电流的方向相反，阻碍原电流增加。当原电流减少时，自感电动势产生的电流方向和原电流方向相同，阻碍原电流减少。自感电动势的大小与线圈电感及流过线圈的电流变化率成正比。

另外，关于两个线圈的串联，前已述及，分顺串和反串，顺串时的总电感 $L=L_1+L_2+2M$，反串时总电感 $L=L_1+L_2-2M$；当两个线圈串联，无互感耦合时，无论顺串还是反串，此时 $L=L_1+L_2$，即总电感等于这两个线圈电感之和。电视机中的行线性校正线圈

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

与行偏转线圈属于无互感耦合的线圈串联，所以无论怎样连接，对电路应该没有影响。

那么，为什么行线性校正线圈不能反接呢？这是因为行线性校正线圈磁芯中有一块永久磁铁，由于永久磁铁有固定的南极和北极，因此该线圈在有电流流过时，通过电感线圈的总磁场为电感线圈中电流产生的磁场与永久磁铁产生的磁场二者的叠加，其中电感线圈中电流产生的磁场方向由电流的方向决定，当电流方向改变时；磁场方向就改变。所以，当线圈中电流产生的磁场方向与永久磁铁的磁场方向相同时，这时线圈产生的自感电动势大，流过线圈的电流小。改变线圈接法，线圈中电流方向改变，磁场方向随之改变，这时与永久磁铁磁场方向相反，产生的自感电动势小，流过线圈的电流大，造成线圈发热加剧，产生严重的“非线性失真。此时若保持行线性校正线圈的这种反向接法，只将磁芯上的永久磁铁取下，改变磁极方向，放在原来位置，这时线圈中电流的磁场方向又和永久磁铁磁场方向相同了，“非线性失真”的现象应立即消除，行线性恢复正常，所以这种行线性校正电感之所以有“极性”，完全是因为永久磁铁引起的。

通过上述分析可知，内有永久磁铁的行线性校正线圈是有“极性”的，接入电路时要注意其“极性”（常在一端标有“·”号，有时在线圈的两端标注“＋”、“－”号，如扬声器的线圈）；没有永久磁铁的行线性校正线圈及其他线圈是没有极性的，怎样连接对电路都没有影响。区分这两种线圈非常简单，只需用一只小改刀触碰线圈，对小改刀有吸引作用的为内有永久磁铁的线圈，没有吸引作用的为磁芯内无永久磁铁的线圈。

第二节　变压器

在实际应用中，常常需要改变交流电的电压，大型发电机发出的交流电，电压有几万伏，而远距离输电却需要高达几十万伏的电压。各种用电设备所需的电压也各不相同，电灯、电炉等家用电器需要 220V 的电压，机床上的照明灯需要 36V 的安全电压，一般电子管的灯丝只需 6.3V 的低电压，电视机显像管高压阳极却需要 1 万多伏的高电压，交流电便于改变电压，以适应各种不同的需要。变压器就是改变交流电电压的设备。

一、变压器的结构

绕在同一骨架或铁芯上的两个线圈便构成了一个变压器。变压器的种类很多，按用途分为电力变压器、调压变压器、电压互感器等。按工作频率不同分为高频变压器、中频变压器和低频变压器。按铁芯使用的材料不同，分为高频铁氧体变压器、铁氧体变压器及硅钢片变压器，它们分别应用于高频、中频及低频电路中。

尽管变压器的种类很多，但基本结构是相同的，都由铁芯和绕组两部分组成。

1. 铁芯

铁芯构成了电磁感应所需的磁路，为了增强磁的交链，尽可能地减小涡流损耗，铁芯常用磁导率较高而又相互绝缘的硅钢片相叠而成。每一片厚度为 0.35mm～0.5mm，表面涂有绝缘漆。铁芯分为芯式和壳式两种。芯式铁芯的特点是：铁芯成“口”形，绕组套在铁芯柱上，该结构多应用于大容量的电力变压器上，如图 8-8(a)所示；壳式铁芯的特点是：铁芯成“日”形，绕组被包围在中间，该结构常用于小容量的电子设备用变压器，如图 8-8(b)所示。

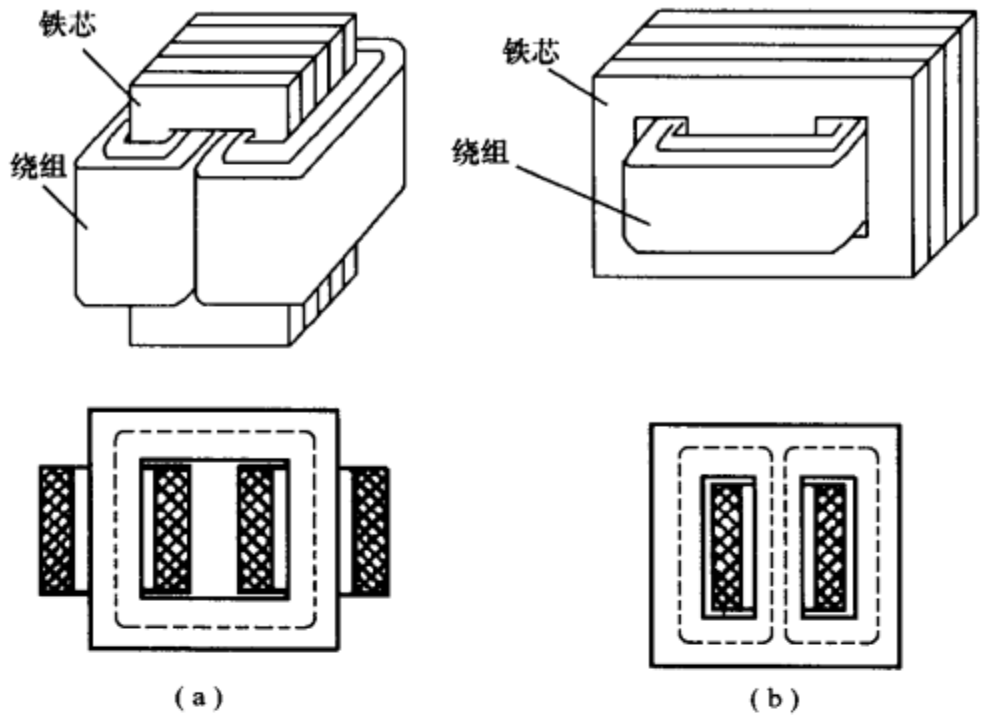


图 8-8　芯式变压器和壳式变压器

(a)芯式变压器；(b)壳式变压器。

2. 绕组

变压器的绕组用绝缘良好的漆包线、纱包线绕成。变压器工作时与电源连接的绕组叫初级绕组(也叫原线圈)，与负载连接的绕组叫次级绕组(也叫副线圈)。通常低压绕组靠近铁芯柱的内层，其原因是低压绕组和铁芯间所需绝缘较为简单。高压绕组在低压绕组的外边。变压器绕组的一个重要问题是必须有良好的绝缘。绕组与铁芯之间、不同绕组之间及绕组的匝间和层间的绝缘要好。为此，生产变压器时还要进行去潮、烘烤、灌蜡、密封等处理。

二、变压器的原理

如图 8-9(a)是变压器的示意图，图 8-9(b)是它的电路符号。在原线圈上加交变电压 U_1，原线圈中就有交变电流，它在铁芯中产生交变的磁通量，这个交变磁通量既穿过原线圈，也穿过副线圈，在原、副线圈中都要引起感生电动势。如果副线圈电路是闭合的，在副线圈中就产生交变电流，它也在铁芯中产生交变磁通量，这个交变磁通量既穿过副线圈，也穿过原线圈，在原、副线圈中同样要引起感生电动势。根据前面所学知识，这种在原、副线圈中由于有交变电流而发生的互相感应现象是互感现象，因此，互感现象是变压器工作的基础。

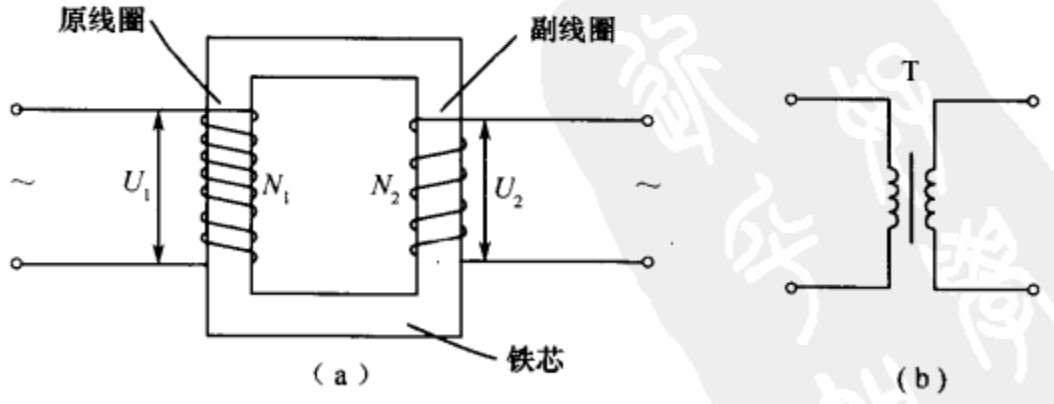


图 8-9　变压器示意图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

1. 电压变换原理(空载运行)

原线圈和副线圈中的电流共同产生的磁通量,绝大部分通过铁芯,只有一小部分漏到铁芯之外,在粗略的计算中可以略去漏掉的磁通量,认为穿过这两个线圈的交变磁通量相同,因而这两个线圈每匝所产生的感生电动势相等。设原线圈的匝数是 N_1,副线圈的匝数是 N_2,穿过铁芯的磁通量是 Φ,那么原、副线圈中产生的感生电动势分别是:

$$e_1 = N_1 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, e_2 = N_2 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

由此可得:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

在原线圈中,感生电动势 e_1 起着阻碍电流变化的作用,与加在原线圈两端的电压 U_1 的作用相反,是反电动势。原线圈的电阻很小,如果略去不计,则有 $U_1 = e_1$。副线圈相当于一个电源,感生电动势 e_2 相当于电源的电动势,副线圈的电阻也很小,如果忽略不计,副线圈就相当于无内阻的电源,因而副线圈的端电压 U_2 等于感生电动势 e_2,即 $U_2 = e_2$。因此得到

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = n \tag{8-10}$$

可见,变压器原线圈与副线圈的电压有效值之比等于这两个线圈的匝数比 n(也称变压比)。如果 $N_2 > N_1$($n < 1$),U_2 就大于 U_1,变压器就使电压升高,这种变压器叫做升压变压器;如果 $N_1 > N_2$($n > 1$),U_1 就大于 U_2,变压器就使电压降低,这种变压器叫做降压变压器;如 $N_1 = N_2$($n = 1$),此时,$U_1 = U_2$,这样的变压器一般称为隔离变压器。

在变压器中,次级线圈的输出电压一定是交流电压,这一电压的频率也一定与加到初级线圈两端的交流电压频率相同。因为初级线圈产生的交变磁场变化规律与输入交流电压的变化规律相同,而次级线圈输出的交流电压变化规律同磁场变化规律一样,这样输出电压频率同输入电压的频率相同。

需要说明的是,当给变压器的初级线圈加上直流电压时,初级线圈中流过的是直流电流,此时初级线圈产生的磁线大小和方向均不变,这时次级线圈就不能产生感生电动势,也就是次级线圈两端无输出电压(没有交流电压也没有直流电压输出)。

由此可知,变压器不能将初级线圈中的直流电流加到次级线圈中,具有隔直的特性。当流过变压器的初级线圈中的电流为交流电流时,次级线圈两端有交流电压输出,所以变压器能够让交流电通过,具有通交的作用。利用变压器的这一特性可以将它作为耦合元器件使用。

阅读材料:隔离变压器的应用

隔离变压器是一个初级与次级绕组匝数比为 1∶1 的变压器。实际上为克服变压器自身的损耗(铜损与铁损),须把次级的匝数多绕 5%左右,即空载时次级电压较初级电压约高 5%。这可以作为区分初级与次级绕组的方法之一。在彩电维修工作中,经常使用隔离变压器。一是为了使次级电压与初级电网电压隔离,实现浮动(悬浮)电位,以保证测

试时的人身安全；二是实现彩电开关电源“热底板”部分与测量仪器（如示波器）外壳接地设备的连接，进行波形观测。此外，隔离变压器还有防雷击功能和滤除电源中杂波干扰的功能。

下面简要说明隔离变压器的“隔离”特性。如图 8-10 所示。

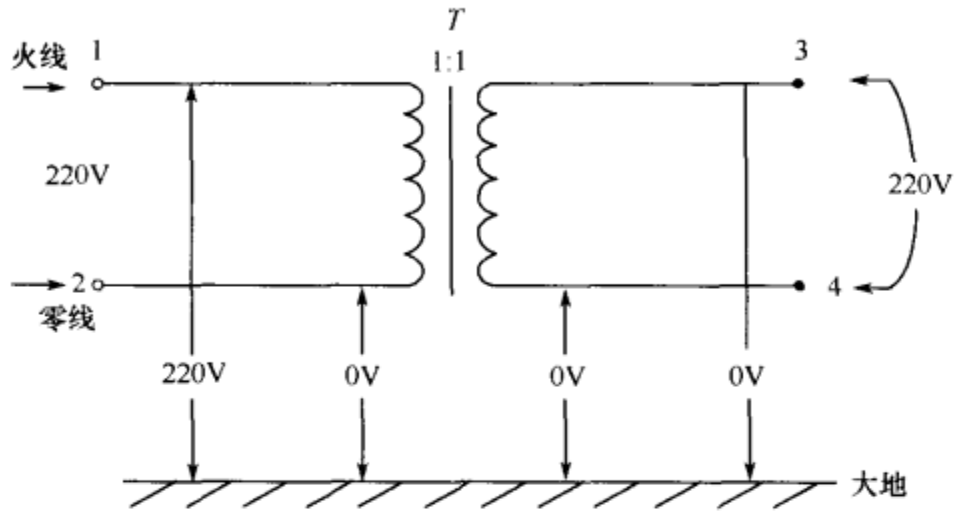


图 8-10　隔离变压器的隔离特性

在目前采用的“三相四线制”供电网中，用电器（负载）必有一根线接相线（火线），一根线接零线（中线），火线与零线之间有 220V 的交流电压，而零线与大地（地球）等电位。人站在大地上接触零线没有生命危险，而直接接触火线有生命危险。

假设这一电路中变压器 T 是一个 1∶1 变压器，当给它输入 220V 交流电压时，它输出的电压也是 220V（变压器输出的 220V 电压是指次级线圈两端之间的电压，即 3、4 端之间的电压）。次级线圈的任一端（如 3 端）对地端之间的电压为 0V，这是因为次级线圈的输出电压不以地为参考端，同时初级和次级线圈之间高度绝缘。这样，当人站在地上时，接触这一电路中 T 的次级线圈任一端都没有生命危险，而不像接触初级线圈的火线端有触电危险。在这个电路中，同样是使用 220V 的交流电压，但使用次级线圈两端的 220V 电压时，只要不同时接触 3、4 端就没有触电的危险，这说明变压器对初级线圈上的交流电压具有隔离作用。

但值得注意的是，当人体同时接触次级线圈的两个端点时，便有 220V 的电压加到人体上，人体会有生命危险。在大多数家用电器中，电源变压器次级线圈输出的交流电压很低（不会达到 220V），所以采用变压器之后不存在触电的危险，这对修理很有益。收录音机、组合音响等均采用电源变压器，只是彩色电视机、显示器等机中不采用电源变压器，所以在修理时最好要用一个隔离变压器，这样可提高安全性。

使用隔离变压器并不能保证 100%的安全，导致触电的充要条件是：与身体接触的两处或以上的导体间存在超过安全电压的电位差，并有一定强度的电流流经人体。隔离变压器可以消除“热地”与电网之间的电位差，一定程度上可以防止触电。但它无法消除电路中各点间固有的电位差，例如各高压阳极，即使使用了隔离变压器，操作时误触了带有高压的部分仍然会遭电击。修理员如果必须带电操作，首先应使身体与大地可靠绝缘，例如坐在木质座位上，脚下踩一块干燥木板或包装用的泡沫之类的绝缘物；平时养成单手操作的习惯，当必须接触带电部位时，防止经另一只手或身体的其他部位形成回路等，都是避免电击的有效措施。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2. 电流变换原理(负载运行)

变压器原线圈、副线圈的电流之间又有什么关系呢?

变压器工作时,输入的功率主要由副线圈输出,小部分在变压器内部损耗了,变压器的线圈有电阻,电流通过时要生热,损耗一部分能量(铜损)。铁芯在交变磁场中反复磁化,也要损耗一部分能量使铁芯发热(铁损)。变压器的能量损耗很小,效率很高,特别是大型变压器,效率可达 97%~99.5%。所以,在实际计算中常常把损耗的能量略去不计,认为变压器的输出功率和输入功率相等。即 $U_1 I_1 = U_2 I_2$,由于 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$,因此:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \tag{8-11}$$

这就是变压器工作时原线圈、副线圈中电流之间的关系。可见,变压器工作时原线圈和副线圈中的电流有效值与线圈的匝数成反比。变压器的高压线圈匝数多而通过的电流小,可用较细的导线绕制;低压线圈匝数少而通过的电流大,应当用较粗的导线绕制。

阅读材料:铜损和铁损

(1)铜损

变压器由于原、副线圈的电阻而造成的能量损耗称为铜损。变压器空载时,由于原线圈的电阻一般都很小,空载电流与电压间的相位差很大(接近 90°),因此铜损可以忽略,即空载时的损耗基本上等于铁损;变压器工作时,铜损主要决定于负载电流的大小,而负载电流的大小不仅与负载阻抗的大小有关,而且与负载阻抗的性质有关,因此铜损的大小实际是由负载的大小与功率因数决定。

(2)铁损

变压器由于铁芯而造成的能量损耗称为铁损,铁损包括两部分:磁滞损耗和涡流损耗。磁滞损耗是由于铁芯在反复磁化过程中,"内摩擦"而造成的损耗,它与铁芯材料的性质(磁导率、矫顽力)有关;涡流损耗是由于铁芯中产生的感生电流——涡电流产生焦耳热而造成的损耗,采用涂有绝缘漆的薄硅钢片叠成的铁芯可以大大减少涡流损失。

铁损的大小除与铁芯本身有关外,还与电源电压的大小有关。当电源电压一定时,铁损基本上是恒定量,与负载电流的大小、性质无关,因此铁损基本上等于它的空载损失。

例 1:如图 8-11 所示电路中,①当 R 上的滑片向下移动时,电流表读数怎样变化?②当电键 S 由 1 掷向 2 时,电流表的读数怎样变化?

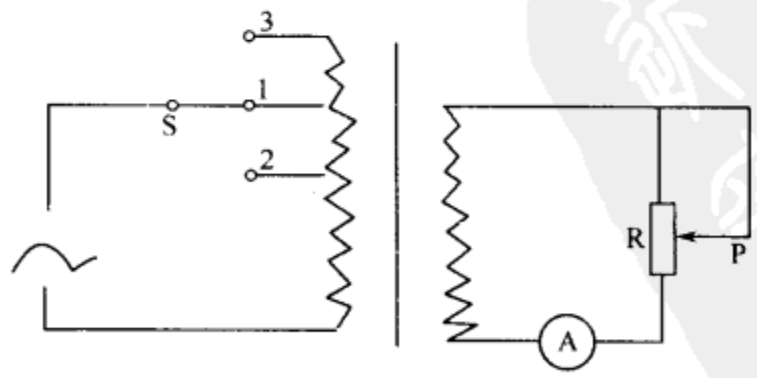


图 8-11　例 1 图

解：①在输入电压和匝数比$\frac{N_1}{N_2}$一定的情况下，输出电压U_2是一定的，当R上的滑片向下移动时，R减小，由$I=\frac{U_2}{R}$可知，电流表读数变大。

②在输入电U_1一定的条件下，当电键S由1掷向2时，匝数比$\frac{N_1}{N_2}$减小，输出电压$U_2\left(U_2=\frac{N_2}{N_1}U_1\right)$增大，由$I=\frac{U_2}{R}$可知，电流表读数变大。

3. 阻抗变换原理

变压器的负载运行时具有变流作用，负载阻抗Z_L决定电流I_2的大小，电流I_2的大小又决定原边电流I_1的大小。可设想原边电路存在一个等效电阻Z'，它的作用是将副边阻抗Z_L折合到原边电路中，如图8-12所示。

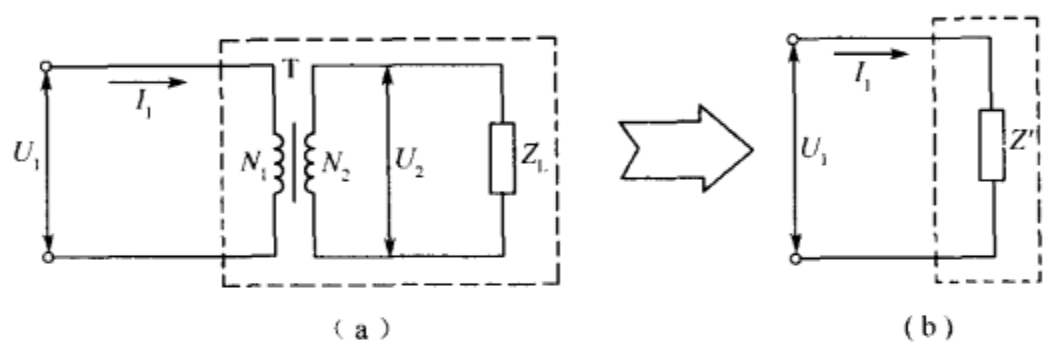


图8-12　变压器的阻抗变换

在副边电路可得：

$$Z_L=\frac{U_2}{I_2}$$

在原边电路可得：

$$Z'=\frac{U_1}{I_1}$$

根据以上两式可得：

$$\frac{Z'}{Z_L}=\frac{U_1}{U_2}\frac{I_2}{I_1}=\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2=n^2，即$$

$$Z'=n^2Z_L \tag{8-12}$$

式(8-12)表明，变压器的副边接上Z_L后，对电源而言，相当于接上阻抗为n^2Z_L的负载，当变压器负载Z_L一定时，改变变压器的原、副线圈的匝数比，可获得所需要的阻抗。

重点提示：电子电路输入端阻抗与信号源内阻相等时，信号源可把信号功率最大限度地传送给电路。同样，当负载阻抗与电子线路的输出阻抗相等时，负载上得到的功率为最大。这种情况称作“阻抗匹配”。然而在实际电路中，信号源和负载的阻抗并不都匹配，需要匹配元件或电路插在两者之间，以实现阻抗匹配。变压器的阻抗变化功能正能实现这种连接。当然在实际应用中，为了获得较好的电压传输效率或减少信号波形失真，应用变压器主要是为了实现合理的阻抗变换而非“完全匹配”。

例2：一只4Ω的扬声器，经变压器接入晶体管功率放大电路中。该功放电路相当于电动势$E=80V$，内阻为$R_0=400\Omega$的交流信号源，求：①该负载所能获得的最大功率是多

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

少？此时变压器的变比是多少？②若将该负载直接接在信号源上，负载获得的功率又是多少？

解：应用变压器阻抗变换原理，实现阻抗匹配，可使负载获得最大功率。

根据已知条件，画出阻抗等效图如图 8-13 所示。

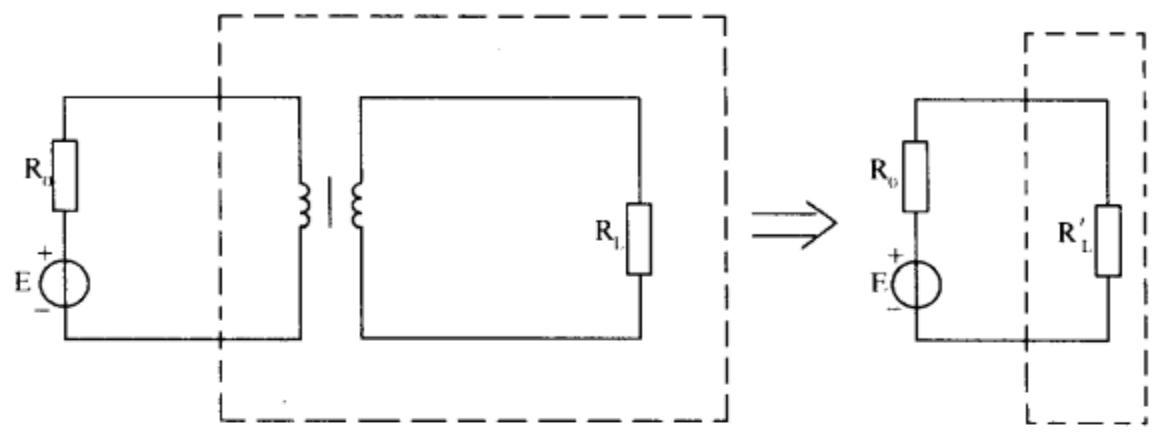


图 8-13　阻抗等效电路图

①当 $R'_L=R_0=400\Omega$ 时，负载将获得最大功率，即：

$$P_{max}=\frac{U^2}{R'_L}=\frac{\left(\frac{1}{2}E\right)^2}{R'_L}=\frac{\left(\frac{1}{2}\times 80\right)^2}{400}=4(\mathrm{W})$$

根据 $R'=n^2R_L$ 可得变压器的变比为：

$$n=\sqrt{\frac{R'_L}{R_L}}=\sqrt{\frac{400}{4}}=10$$

②若负载直接接在信号源上，则负载获得的功率是：

$$P=\frac{\left(\frac{R_L}{R_L+R_0}E\right)^2}{R_L}=\frac{\left(\frac{4}{4+400}\times 80\right)^2}{4}=0.157(\mathrm{W})$$

可见，通过选择变比，获得所需要的阻抗，从而可使负载获得最大功率。

三、变压器的功率和效率

1. 变压器的功率

变压器初级的输入功率为：

$$P_1=U_1I_1\cos\phi_1 \tag{8-13}$$

式中，ϕ_1 为初级电压与电流的相位差。

变压器次级的输出功率为：

$$P_2=U_2I_2\cos\phi_2 \tag{8-14}$$

式中，ϕ_2 为次级电压与电流的相位差。

变压器的损耗功率为输入功率和输出功率之差，即

$$P_{损}=P_1-P_2 \tag{8-15}$$

2. 变压器的效率

变压器的输出功率 P_2 与输入功率 P_1 之比，称为变压器的效率，即

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}\times 100\% \tag{8-16}$$

为了减小损耗、提高效率，变压器一般采用如下措施：

①为减少磁滞损耗，采用磁滞回线面积较小的磁性材料——软磁材料，如硅钢片、坡莫合金及铁氧体等。

②在铁芯材料方面，采用电阻率较高的导磁材料，如硅钢片。这些措施可以增大涡流通路中的电阻，从而降低涡流损耗。

③在铁芯结构方面，将整块铁芯改为由 0.35mm～0.55mm 厚的硅钢片叠装而成，硅钢片之间彼此绝缘。

例 3：将电阻 R_1 和 R_2 如图 8-14(a)所示接在变压器上，变压器原线圈接在电压恒为 U 的交流电源上，R_1 和 R_2 上的电功率之比为 2∶1，若其他条件不变，只将 R_1 和 R_2 改成如图 8-14(b)接法，R_1 和 R_2 上的功率之比为 1∶8。若图(a)中原线圈电流为 I_1，图(b)中原线圈电流为 I_2，求：①两组副线圈的匝数之比；②I_1 和 I_2 之比。

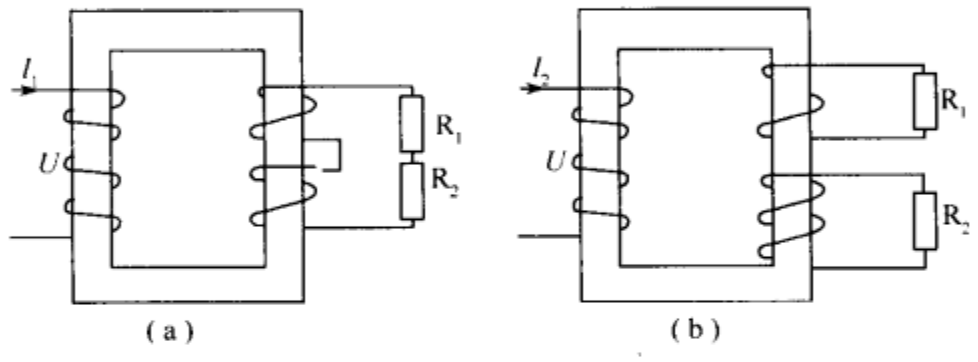


图 8-14　例 3 图

解：①图(a)中 R_1 和 R_2 串联，电流相同，功率与电阻成正比，所以有：

$$R_1=2R_2 \tag{1}$$

设三组线圈的匝数分别是 N_1、N_2、N_3，两组副线圈上的电压分别是 U_2 和 U_3，可得：

$$U_2=\frac{N_2}{N_1}U,\quad U_3=\frac{N_3}{N_1}U$$

图(b)中，R_1 和 R_2 上的功率之比为 1∶8，即

$$8\frac{\left(\frac{N_2}{N_1}U\right)^2}{R_1}=\frac{\left(\frac{N_3}{N_1}U\right)^2}{R_2} \tag{2}$$

联列式(1)和式(2)解得：

$$\frac{N_2}{N_3}=\frac{1}{2}$$

②设图(a)中输出功率为 P_1，则

$$P_1=\left(\frac{N_2+N_3}{N_1}U\right)^2/(R_1+R_2)$$

设图(b)中输出功率为 P_2，则

$$P_2=\left(\frac{N_2}{N_1}U\right)^2/R_1+\left(\frac{N_3}{N_1}U\right)^2/R_2$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

以 $R_1=2R_2$，$N_3=2N_2$ 代入，可得：

$$\frac{P_1}{P_2}=\frac{2}{3}$$

由于输入功率等于输出功率，所以图(a)、图(b)中输入功率之比也为$\frac{2}{3}$，根据 $P=IU$，电压恒定，所以两图中电流之比 $I_1:I_2=2:3$。

例 4：发电厂输出的交流电压为 22KV，输送功率为 2.2×10^6 W。现在用户处安装一降压变压器，用户的电压为 220V，发电厂到变压器间的输电导线总电阻为 22Ω。求：①输电导线上损失的电功率；②变压器原副线圈匝数之比。

解：(1)应先求出输送电流，由：

$$I_{总}=\frac{P_{总}}{U_{总}}=\frac{2.2\times10^6}{2.2\times10^4}=100(\text{A})$$

则损失功率为：

$$P_{损}=I_{总}^2R=100^2\times22=2.2\times10^5(\text{W})$$

(2)变压器原线圈电压 U_1 为：

$$U_1=U_{总}-U_{损}=U_{总}-I_{总}R=2.2\times10^4-100\times22=19800(\text{V})$$

所以原副线圈匝数比$\frac{N_1}{N_2}=\frac{U_1}{U_2}=\frac{19800}{220}=90$

四、变压器的额定值

为确保变压器合理、安全运行，生产厂家根据国家技术标准，对变压器的工作条件进行了使用上的规定，为用户提供了变压器的允许工作数据，称为额定值。它们通常标注在变压器的铭牌上，故也称为铭牌值，并用下标“N”表示。

1. 额定电压(U_{1N}/U_{2N})

根据变压器的绝缘强度和允许温升所规定的电压值，U_{1N}是指原边电源电压的有效值，U_{2N}是指当原边加电压 U_{1N}时，副边空载时副边电压的有效值。对于三相变压器，额定电压是指线电压的有效值。

2. 额定电流(I_{1N}/I_{2N})

原、副边额定电流值 I_{1N}和 I_{2N}是指原、副边允许通过的最大电流，是根据绝缘材料允许的温度确定的。变压器的满载运行是指变压器负载运行时的副边电流 $I_2=I_{2N}$的运行方式，也称为变压器带额定负载运行；欠载运行是指 $I_2<I_{2N}$的运行方式；过载运行则是指 $I_2>I_{2N}$的运行方式。

3. 额定容量(S_N)

S_N 是指副边输出的额定视在功率，单位是 VA 或 kVA。由于变压器的效率很高，所以，通常原、副边的额定容量设计得相等。

对于单相变压器：$S_N=U_{2N}I_{2N}=U_{1N}I_{1N}$

对于三相变压器：$S_N=\sqrt{3}U_{2N}I_{2N}=\sqrt{3}U_{1N}I_{1N}$

重点提示：S_N反映了变压器传输电功率的能力，但不是实际的输出功率 P_2。这是因

为 P_2 为负载的功率，与负载的功率因数有关。例如，容量为 $S_N=10\text{kVA}$ 的变压器，当接入的 $\cos\phi=0.8$ 的额定负载时，变压器的输出功率为：

$$P_2=U_{2N}I_{2N}\cos\phi=S_N\cos\phi=10\times0.8=8(\text{kW})$$

所以，为充分发挥变压器的性能，希望负载的功率因数越大越好。

4. 额定频率(f_N)

f_N 是指变压器的工作频率，单位为 Hz。我国规定的工业标准频率(简称工频)为 50Hz(某些国家为 60Hz)。频率的改变将影响变压器的某些工作参数，影响变压器的运行性能。

例 5：一台单相变压器，额定容量 $S_N=180\text{kVA}$，其额定电压为 6000V/230V，变压器的铁损为 0.5kW，满载时的铜损为 2kW，如果变压器在满载情况下向功率因数为 0.85 的负载供电，这时副绕组的端电压为 220V。求：①变压器的效率？②问这台变压器能否允许接入 120kW，功率因数为 0.55 的感性负载？

解：①

$$I_{2N}=\frac{S_N}{U_{2N}}=\frac{180\times10^3}{230}=783(\text{A})$$

$$P_2=U_2I_2\cos\phi=220\times783\times0.85=146(\text{kW})$$

$$\eta=\frac{P_2}{P_2+P_{损}}=\frac{146\times10^3}{146\times10^3+0.5\times10^3+2\times10^3}=98\%$$

②

$$I_2=\frac{P_2}{U_2\cos\phi}=\frac{120\times10^3}{220\times0.55}=992(\text{A})>I_{2N}$$

所以，不允许接入该负载。

五、特殊变压器

变压器的种类很多，除常见的电力变压器外，再介绍几种常用的变压器。

1. 自耦变压器

图 8-15 是自耦变压器的示意图。这种变压器的特点是铁芯上只绕一个线圈，如果把整个线圈作原线圈，只取线圈的一部分作副线圈，就可以降低电压，如图 8-15(a)所示；如果把线圈的一部分作原线圈，整个线圈作副线圈，就可以升高电压，如图 8-15(b)所示。

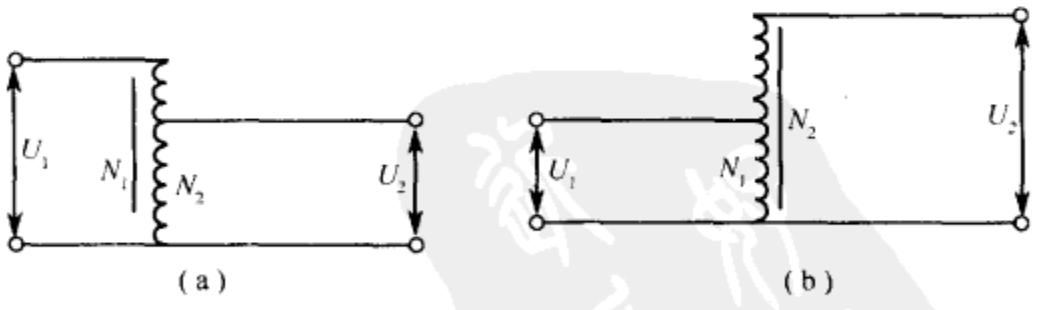


图 8-15　自耦变压器

自耦变压器的原、副边不仅有磁的耦合，还存在着电的直接联系，这是区别于普通变压器之处。由于自耦变压器在磁路上原、副绕组自相耦合，这就是“自耦”的来源。

自耦变压器的电压、电流变换作用与普通变压器相似，即 $\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}$、$\frac{I_1}{I_2}=\frac{N_2}{N_1}$。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

调压变压器就是一种自耦变压器，它的构造和电路如图 8-16 所示。自耦变压器的副边抽头制成沿绕组自由滑动的触头，这样可以自由、平滑地调节输出电压。

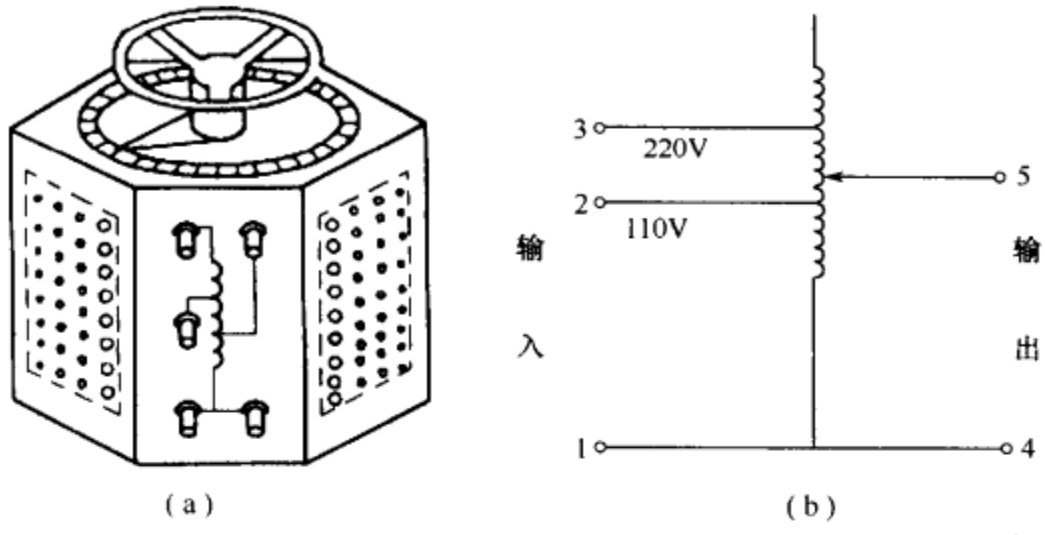


图 8-16　调压器的外形和电路

使用自耦变压器要注意以下几点：

①原、副边绕组不能接错，否则会烧毁变压器。

②接电源的输入端共三个，用于 220V 或 110V 电源，不可将其接错，否则会烧毁变压器。

③接通电源前，要将手柄转到零位；接通电源后，渐渐转手柄，调节出所需要的输出电压为止。

2. 互感器

互感器也是一种变压器，交流伏特表和安培表都有一定的量度范围，不能直接测量高电压和大电流。高电压对人有危险，为了保证工作人员的安全也不能把电表直接接入高压电路中，用变压器把高电压变成低电压，或者把大电流变成小电流，这个问题就可以解决了。这种变压器叫做互感器，互感器分电压互感器和电流互感器两种。

(1)电压互感器

电感互感器用来把高电压变成低电压，它的原线圈并联在高压电路中，副线圈上接入交流伏特表。根据伏特表测得的电压 U_2 和铭牌上注明的变压比(U_1/U_2)，可以算出高压电路中的电压。如图 8-17(a)为电压互感器的测试电路。

由于电压表的阻抗很大，因此，电压互感器的工作情况与普通变压器的空载运行相似，即 $\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}=n$($n$ 为电压互感器的变比，且 $n>1$)。为使仪表标准化，使其副边的额定电压均为标准值 100V，对不同额定电压等级的高压线路选用各相应变比的电压互感器，如有 6000V/100V、10000V/100V 等不同型号的电压互感器。

电压互感器的副边不能短路，否则会因短路电流过大而烧毁；其次，电压互感器的铁芯、金属外壳和副边的一端必须可靠接地，防止绝缘损坏时，副边出现高电压而危及运行人员的安全。

(2)电流互感器

电流互感器用来把大电流变成小电流，所以其原边匝数少，副边匝数多。由于电流互感器是测量电流的，所以其原边应串接于被测线路中，副边与电流表相串接，根据安培表

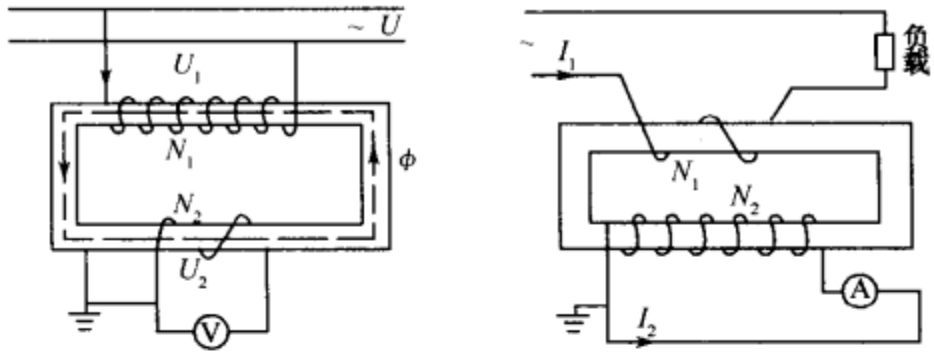


图 8-17　电压互感器与电流互感器

测得的电流 I_2 和铭牌上注明的变流比(I_1/I_2),可以算出被测电路中的电流。如图 8-17(b)为电流互感器的测试电路。

由于电流表等负载的阻抗都很小,因此电流互感器的工作情况相当于副边短路运行的普通变压器。通常,电流互感器的副边额定电流设计成标准值 5A。如 30A/5A,75A/5A、100A/5A 等不同型号的电流互感器。选用时,应使互感器的原边额定电流与被测电路的最大工作电流一致。

测流钳是电流互感器的一种变形。它的铁芯如同一把钳子,用弹簧压紧。测量时将钳压开而引入被测导线。这时该导线就是原绕组,副绕组绕在铁芯上并与安培计接通。利用测流钳可以随时随地测量线路中的电流,不必像普通电流互感器那样必须固定在一处或者在测量时要断开电路而将原绕组串接进去。测流钳的原理图如图 8-18 所示。

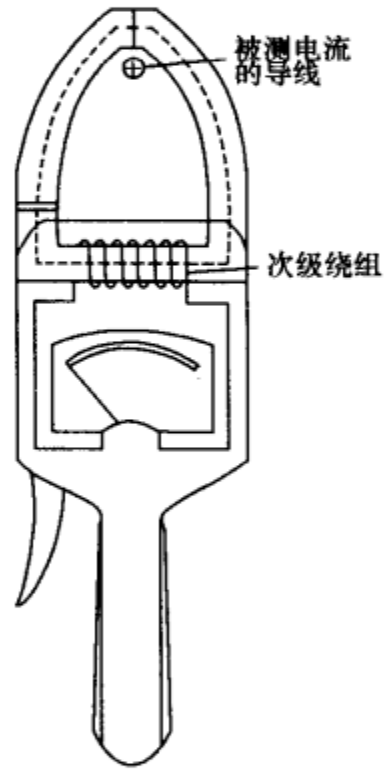


图 8-18　测流钳

在使用电流互感器时,副绕组电路是不允许断开的。这点和普通变压器不一样。因为它的原绕组是与负载串联的,其中电流 I_1 的大小取决于负载的大小,不是取决于副绕组电流 I_2。所以当副绕组电路断开时(如在拆下仪表时未将副绕组短接),副绕组的电流和磁动势立即消失,但是原绕组的电流 I_1 未变,这时铁芯内的磁通全由原绕组的磁动势 I_1N_1 产生,结果造成铁芯内很大的磁通(因为这时副绕组的磁动势为零,不能对原绕组的磁动势起去磁作用了)。这一方面使铁损大大增加,从而使铁芯发热到不能容许的程度;另一方面又使副绕组的感应电动势增高到危险的程度。

阅读材料:感应圈

感应圈是工业生产和实验室中用直流电源获得高压的一种装置。它与互感器的唯一区别在于多了一个断续器。

感应圈的工作原理如图 8-19 所示。闭合电键 K,使电流通过初级线圈,铁芯因被磁化而吸引小铁锤 M,使 M 与螺钉 D 分离,电路重被切断。电路一旦被切断,铁芯的磁性消失,M 在弹簧片的弹力作用下又重新和螺钉 D 相接触,于是电路重新被接通。这样,由于断续器的作用,初级线圈电路的接通和断开,将自动地反复进行,导致初级线圈中的电流不断地变化。这样,通过互感,在次级线圈中产生感应电动势。由于次级线圈的匝数

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

N_2远远多于初级线圈的匝数 N_1，所以在次线圈中能获得高达 1 万到几万伏的电压。这样高的电压，足以使 ab 间产生火花放电现象。

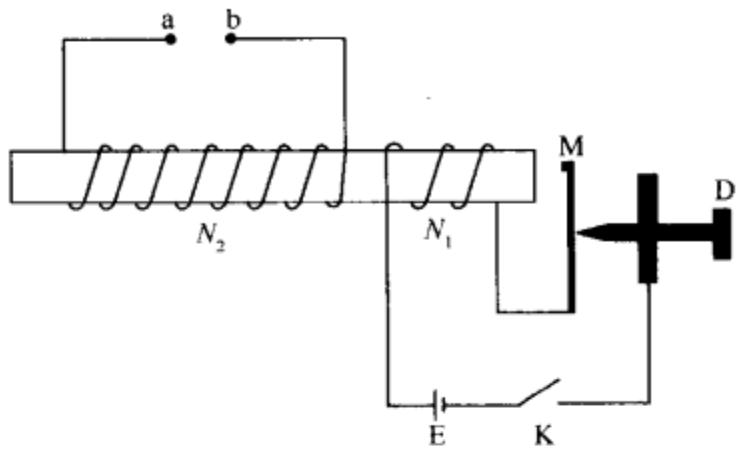


图 8-19　感应圈

六、变压器的同名端特性说明

在前面介绍互感时，提到了互感线圈的同名端及其判定方法，由于变压器是根据互感原理制成的，因此，变压器也存在同名端的特性，下面以图 8-20 为例简要说明。

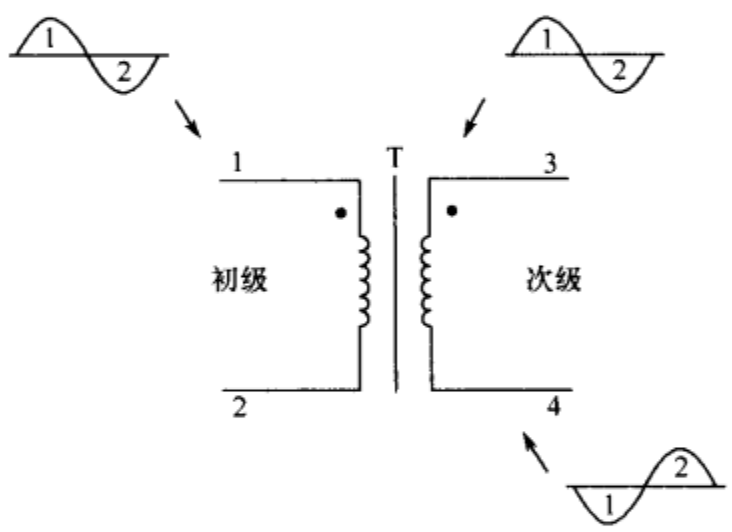


图 8-20　变压器的同名端特性

电路中，T 是一个变压器，从图中可以看出，在变压器的 1 和 3 端各标出一个黑点，这是同名端的标记，表示 1 端和 3 端是同名端。说明这两个端点电压是同相位的关系。同相位就是这两个端点电压同时增大，同时减小(若一个端点在增大，另一个端点在减小，称为反相)。

通过波形，可以形象地表示变压器同名端的意义。从图 8-20 中的波形可以看出，变压器的 1 端和 3 端的电压波形是同时增大，同时减小的，因此，1 端和 3 端是同名端；而次级线圈 4 端电压波形与 1 端电压波形恰好相反，即 1 端与 4 端是异名端。

当只考虑变压器输出电压大小而不考虑输出电压相位时，可不标出同名端。但是，在有些振荡器的正反馈电路中，为了分析正反馈过程方便，要求了解变压器初级和次级线圈输出电压的相位，此时要在变压器中标出同名端。注意，同名端只出现在紧耦合的变压器中。

七、电源变压器的设计

电源变压器是根据互感原理制成的一种常用变压器，其作用是把市电交流 220V 变换成适合需要的高低不同的交流电压，供有关电路使用。电源变压器在家用电器设备中得到了广泛应用。下面以 E 形铁芯为例，介绍电源变压器的设计制作方法。

1. 制作电源变压器的材料

(1)硅钢片

硅钢片用于制作变压器的铁芯。E形铁芯的形状如图8-21所示。图中,a表示铁芯舌宽,b表示铁芯叠厚,c表示铁芯窗口宽度,h表示窗口高度。

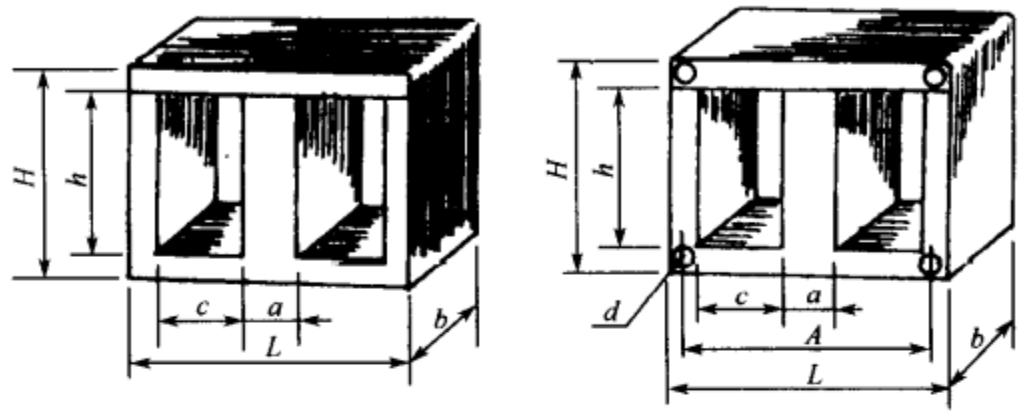


图8-21　硅钢片

(a)无固定孔;(b)带固定孔。

(2)导线

导线用于绕制变压器各级绕组用。常用的导线是漆包线。

(3)胶木板

胶木板做线圈骨架用。有的变压器也可用弹性纸做骨架。

(4)绝缘纸

绝缘纸做层间绝缘和绕组间绝缘材料用。常用的绝缘纸有电缆纸、黄蜡绸、牛皮纸和聚酯薄膜等。一般选用层间绝缘纸的厚度视导线直径的大小而定。

2. 计算

①计算次级输出总功率P_2。

$P_2=U_{21}I_{21}+U_{22}I_{22}+\cdots+U_{2n}I_{2n}$(未考虑功率因素)

式中,U_{21}、U_{22}、U_{2n}分别为各次级绕组的电压值;I_{21}、I_{22}、I_{2n}分别为各次级绕组的电流值。

②计算初级的输入功率P_1及电流I_1。

P_1可根据公式$\eta=\frac{P_2}{P_1}$来推算。

η为效率,对于10VA以下的变压器,η为0.6～0.7;对于10VA～30VA的变压器,η为0.7～0.8;对于35VA～50VA的变压器,η为0.8～0.85;对于50VA～100VA的变压器,η为0.85～0.9。

③计算铁芯截面积S。

$$S=K\sqrt{P_0}$$

式中,$P_0=\frac{P_1+P_2}{2}$

S的单位为cm^2,P的单位为伏安(VA)。K为系数,此系数根据所选用的硅钢片的质量优劣而定,一般型号为D42、D43等硅钢片的磁感应强度B为1T～1.2T,K取1.25;若硅钢片的质量较好,如D310型硅钢片,B为1.2T～1.4T,则K可取小一些;质量较差的硅钢片,如D21、D22等,B仅为0.5T～0.7T,系数K须取2。业余条件下取用的硅钢

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

片常常不知道它的型号和 B 的数值，但可从外形来估计，如果硅钢片的厚度薄，质地脆，折断后裂口处亮晶晶的，则磁性能较优，B 一般在 1T 以上；如果硅钢片较厚，且质地软，则磁性能较差，B 一般在 0.5T 左右。

④选择铁芯规格并计算其叠厚 b。

在算出所需的铁芯截面积之后，便可选择具体使用的铁芯的规格，并算出其叠厚 b。计算公式如下：

$$b=\frac{S}{a}$$

式中，b 为铁芯的叠厚，S 为所需的铁芯截面积，a 为铁芯的舌宽。铁芯规格选定之后，a 便确定，可算出铁芯的叠厚 b，每片硅钢片的厚度（一般为 0.35mm～0.5mm）选好以后，就可以计算出片数。

⑤计算初级绕组每伏匝数 N_0 和次级绕组每伏匝数 N_0' 以及次级各绕组的匝数 N_n

根据公式可求出初级每伏匝数，即

$$N_0=\frac{4.5\times10}{BS}$$

式中，B 的单位为 T，S 的单位为 cm^2。

为了补偿铁芯和铜线中的功率损耗，次级各绕组的实际匝数应比计算值增加 5%左右，即次级各绕组的每伏匝数：

$$N_0'=1.05N_0$$

因此各次级绕组的匝数：

$$N_n=N_0'U_n=1.05N_0U_n$$

⑥计算各绕组的导线直径 d。

$$d=1.13\sqrt{\frac{I}{J}}$$

式中，d 的单位为 mm，I 的单位为 A；电流密度 J 的单位为 A/mm^2，J 的取值与变压器的使用条件、功率大小有关。一般 100VA 以下连续工作的变压器 J 取 $2.5A/mm^2$，而 100VA 以上的变压器，J 应取 $2A/mm^2$。

3. 设计举例

例 6：设计一只稳压电源上的变压器，电路如图 8-22 所示。初级供电电压为市电交流电压 220V，要求次级有四个绕组，分别为 36V/2A，30V/0.5A，24V/1A 和 6.3V/2A。

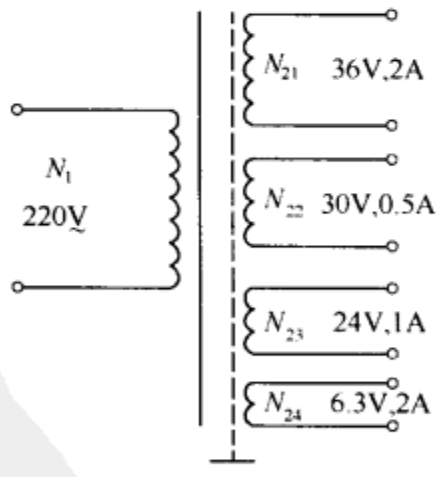


图 8-22　电源变压器

解：①计算变压器次级总功率 P_2。

$$P_2=U_{21}I_{21}+U_{22}I_{22}+\cdots+U_{2n}I_{2n}=$$

$$36\times2+30\times0.5+24\times1+6.3\times2=123.6(VA)$$

②计算初级的输入功率 P_1（η 取 0.85）和初级电流 I_1。

$$P_1=\frac{P_2}{\eta}=123.6\div0.85=145.4(VA)$$

$$I_1=\frac{P_1}{U_1}=145.4\div220=0.66(\text{A})$$

③计算铁芯截面积 S。

$$S=K\sqrt{P_0}=1.25\sqrt{\frac{123.6+145.4}{2}}=14.5(\text{cm})$$

④选择铁芯规格并计算其叠厚 b。

选用 CEIB-40 标准铁芯，该铁芯的舌宽 $a=4\text{cm}$，窗宽 $c=2.6\text{cm}$，窗高 $h=7.2\text{cm}$，则

$$b=\frac{S}{a}=14.5\div4=3.625(\text{cm})$$

为了减小每匝伏数，取 $b=4.6\text{cm}$，并选用 0.35mm 的硅钢片，则

$$S=4.6\times4=18.4(\text{cm}^2)$$

所需铁芯片数 $=b\div0.35=131$(片)

⑤计算每伏匝数。

初级绕组每伏匝数(B 取 0.7T)：

$$N_0=\frac{4.5\times10}{BS}=(4.5\times10)\div(0.7\times18.4)=3.5(\text{匝/V})$$

次级绕组每伏匝数：

$$N_0'=1.05N_0=3.7(\text{匝/V})$$

⑥计算初次级各绕组的匝数。

初级绕组：$N_1=N_0U_1=3.5\times220=770$(匝)

次级绕线：$N_{21}=N_0'U_{21}=3.7\times36\approx133$(匝)

$N_{22}=N_0'U_{22}=3.7\times30=111$(匝)

$N_{23}=N_0'U_{23}=3.7\times24\approx89$(匝)

$N_{24}=N_0'U_{24}=3.7\times6.3\approx23$(匝)

⑦计算各绕组线径。

J 取 2.5A/mm^2，则

$$d=1.13\sqrt{\frac{I}{J}}=0.72\sqrt{I}$$

初级绕组线径：

$d_1=0.72\sqrt{I}=0.72\sqrt{0.66}=0.58(\text{mm})$，选用 ϕ0.64mm 漆包线

次级各绕组线径：

$d_{21}=0.72\sqrt{2}=1.02(\text{mm})$，选用 ϕ1.20mm 漆包线

$d_{22}=0.72\sqrt{0.5}=0.51(\text{mm})$，选用 ϕ0.55mm 漆包线

$d_{23}=0.72\sqrt{1}=0.72(\text{mm})$，选用 ϕ0.80mm 漆包线

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$d_{24}=0.72\sqrt{2}=1.02(\text{mm})$$，选用 ϕ1.20mm 漆包线

4. 线圈的绕制

(1)制作木芯

图 8-23 所示的木芯是在绕制线圈时用来支撑绕组骨架的。

木芯的截面应稍比变压器铁芯截面大一些，使插入硅钢片时不损坏绕好的线包。木芯的长度应比铁芯窗口高度长一些，其中心孔必须钻得正直。

(2)制作线圈骨架

线圈骨架除了起支撑线圈作用外，还起绝缘作用。一般可用弹性纸制作框骨架，如图 8-24 所示。

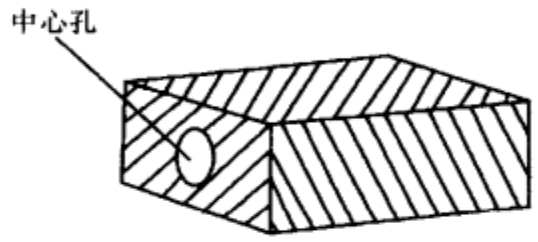


图 8-23　木芯的形状

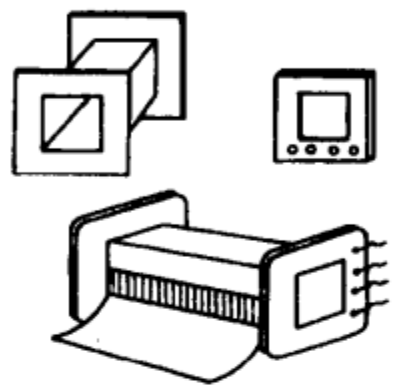


图 8-24　骨架

框骨架的长度应比铁芯窗高稍短些(约短 1.5mm 左右)。线圈骨架还可以采用现成的塑料或尼龙框骨架。

(3)绕线

先裁剪好绝缘纸。纸的宽度应等于线圈骨架的长度，而长度应稍大于线圈骨架的周长。开始绕线前先在套好木芯的线圈骨架上衬垫两层厚 0.05mm 的聚酯薄膜和一层厚 0.05mm 的牛皮纸，并用胶水粘牢，然后将木芯中心孔穿入绕线机轴，并用螺母紧紧固定。起绕时在导线引绕头(或结束时的线尾)压入一条 10mm 宽的黄蜡布折条，以便抽紧起始线头(或线尾)。

漆包线应一圈紧挨一圈地整齐排列，排满一层后，垫上绝缘材料后再绕第二层，直至绕足所需的圈数。各绕组绕制的次序为初级、静电屏蔽、次级高压绕组、次级低压绕组。静电屏蔽层常用铜箔或铝箔在初级绕组外缠绕一层，但两头重合处不能短路。同时，在金属箔上引出一根导线。绕组的初、次级间或各绕组间必须注意绝缘良好，线圈的最外层应包上厚的牛皮纸或者青壳纸，以增强线包的机械强度。

绕圈的引出线，一般可用铜片条或多股绝缘软线，对于用粗漆包线绕制的线圈，也可以使用线圈本身的线引出，外面再加绝缘套管。

绕线示意图如图 8-25 所示。

(4)插硅钢片

绕好线圈后取出木芯，可给绕组插入硅钢片，一般把硅钢片以两片为一组，交替地插入线包内，如图 8-26 所示。

当线包内将插满硅钢片时，余下的大约 1/6 硅钢片往往比较难插入(俗称紧片)，这部分硅钢片需用旋凿撬开每两片一组的硅钢片夹缝才能插入，并用木锤轻轻敲入。插完硅钢片的变压器应放在平板上，两头用木锤敲打平整(尤其要注意硅钢片“E”形与“I”形的对接处不

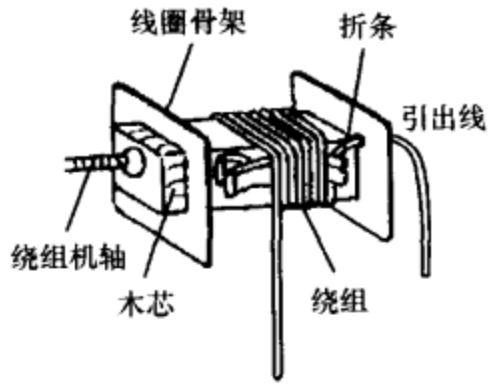


图 8-25　绕线的方法

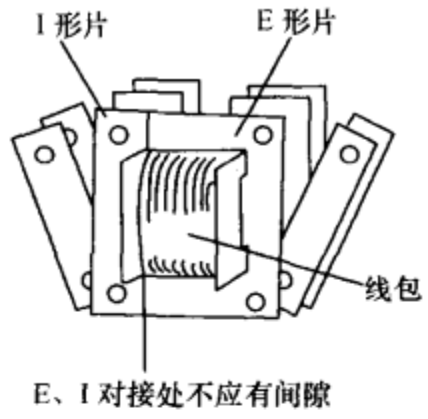


图 8-26　插硅钢片

能留有缝隙)。然后将硅钢片夹紧、固定。在插片时,硅钢片表面的绝缘层最好不要损伤。

(5)绝缘处理

为了防潮和增加绝缘强度,制作好的变压器应做绝缘处理。将烘干后的变压器浸入绝缘清漆中,待漆全部渗入后,将其取出烘干或晾干。要提醒的是,在给变压器上漆之前,务必测试一下性能是否合乎要求。

八、变压器的屏蔽

在给变压器的初级线圈通入交流电后,线圈周围产生了磁场,尽管有铁芯给绝大部分磁力线构成了磁路,但仍有一小部分磁力线散布在变压器附近的一定空间范围内。若这些残余磁力线通过了变压器附近的其他线圈(或电路),在其他线圈中也要产生感生电动势,这便是磁干扰,是不允许的,为此,要给变压器加上屏蔽壳,使变压器中的磁场不向外辐射。变压器的屏蔽壳不仅可以防止变压器干扰其他电路,也可以防止其他散射磁场对变压器正常工作的干扰。

低频变压器中,采用铁磁材料制成一个屏蔽盒(如铁皮盒),将变压器包起来。由于铁磁材料的磁导率高、磁阻小,所以变压器产生的磁力线由屏蔽壳构成回路,防止了磁力线穿出屏蔽壳,使壳外的磁场大大减小。

同理,外界的杂散磁力线也被屏蔽壳所阻挡,不能穿到壳内来。

在高频变压器中,由于铁磁材料的磁介质损耗大,所以不用铁磁材料作为屏蔽壳,而是采用电阻很小的铝、铜材料制成。当高频磁力线穿过屏蔽壳时,产生了感生电动势,此电动势又被屏蔽壳所短路(屏蔽壳电阻很小),产生涡流。此涡流又产生反向磁力线去抵消穿过屏蔽壳的磁力线,使屏蔽壳外的磁场大大减小,达到屏蔽的目的。

阅读材料:磁场屏蔽

在无线电技术中,常常遇到两个电路中的信号相互干扰、相互影响的情况,在第 1 章讲述了静电屏蔽(电场屏蔽)的方法。在使用线圈元件时,其周围的磁场也存在耦合互感现象,可以利用磁耦合互感达到传递信号的目的。但有时需要消除这种互感耦合,即采用磁场屏蔽方法。

磁屏蔽是使用导磁材料把电感线圈罩起来,使其本身的磁场不外泄,外界磁场不进入罩内,从而达到磁屏蔽的目的。导磁材料要使用软磁材料,如软铁片、坡莫合金等。被磁屏蔽的元件有磁头、线圈、变压器等。必要时还可再加上一层铜屏蔽罩,达到高频和低频同时屏蔽的效果。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第九章　电路的过渡过程

本章主要分析 RC、RL 线性电路的过渡过程。通过本章的学习，可使读者对线性电路的过渡过程具有初步的理论基础，本章着重讨论两个问题：一是过渡过程中电压和电流随时间而变化的规律；二是影响过渡过程快慢的时间常数。

第一节　电路的过渡过程

一、电路的过渡过程

自然界事物的运动，在一定的条件下有一定的稳定状态。条件发生改变，就要过渡到新的稳定状态。像电动机从静止状态（一种稳定状态）启动，它的转速从零逐渐上升，最后到达稳态值（新的稳定状态）；当电动机停下来时，它的转速从某一稳态值逐渐下降，最后为零。又如，电动机通电运转时，就要发热，温升（比周围环境温度高出之值）从零逐渐上升，最后到达稳态值；当电动机冷却时，温升也是逐渐下降的。由此可见，从一种稳定状态转到另一种新的稳定状态往往不能跃变，而是需要一定过程（时间），这个物理过程就称为过渡过程。

在电路中也有过渡过程。在实验室中做一个如图 9-1 所示的电路实验。只要适当地选择 R、L、C 元件的参数，就可以明显地看到：当开关 S 闭合时，与电阻串联的灯泡 D_R 会立即亮，与电感串联的灯泡 D_L 逐渐变亮，而与电容串联的电灯泡 D_C 由亮逐渐变为不亮。这说明电阻元件接通电源后其电流从零到达新的稳态值是立即完成的，电阻的电压与电流产生了跃变，所以电阻支路没有过渡过程。电感支路在开关闭合的瞬间，由于电流的变化率最大，电感电压等于电源电压 U_S，使灯泡的电压为零，电路中没有电流，因此 D_L 不亮；开关闭合后电感电流逐渐增大，灯泡逐渐变亮，而电流变化率减小，到达新的稳态值时，电感对于直流相当于短路，此时电感电压为零，灯泡电压等于电源电压，因此 D_L 达到最亮，所以电感电流由零到达稳态值要有一个过渡过程。电容支路在开关闭合瞬间，电容没有储存电荷，电容电压为零，这时灯泡的电压等于电源电压 U_S，所以 D_C 最亮；开关闭合后，随着电容充电电压的升高，U_c 的电压逐渐减小，灯泡随之变暗，当电容电压等于电源电压时，电路到达新的稳定状态，电容对直流相当于开路，没有电流通过灯泡，因此 D_C 不亮，所以电容电压由零到达稳态值也要有一个过渡过程。

二、电路过渡过程产生的原因

上述实验现象表明，电路产生过渡过程的原因有两个：其一是电路中存在动态元件 L 或 C，这是产生过渡过程的内因；其二是电路的结构或参数发生改变，例如开关的打开或闭合，元件的接通与断开等，这是产生电路过渡过程的外因。

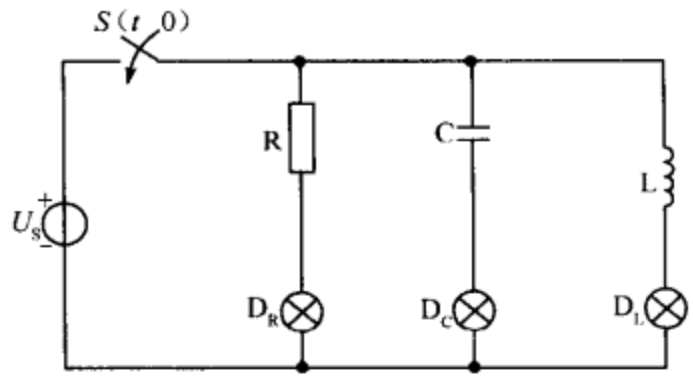


图 9-1　过渡过程实验

三、研究电路过渡过程的意义

前面几章讨论的是电路的稳定状态。所谓稳定状态，就是电路中的电流和电压在给定的条件下已到达某一稳态值(对交流讲是指它的幅值到达稳定)。稳定状态简称稳态。电路的过渡过程往往为时短暂，所以电路在过渡过程中的工作状态常称为暂态，因而过渡过程又称为暂态过程。暂态过程虽然为时短暂，但在不少实际工作中却是极为重要的。

比如在研究脉冲电路时，经常遇到的是电子器件的开关特性和电容器的充放电。由于脉冲是一种跃变的信号，并且持续时间很短，因此我们注意的是电路的暂态过程，即电路中每个瞬时的电压和电流的变化情况。此外，在电子技术中也常利用电路中暂态过程现象来改善波形以及产生特定的波形。但是电路的暂态过程也有其有害的一面，例如某些电路在接通或断开的暂态过程中，要产生电压过高(称为过电压)或电流过大(称为过电流)的现象，从而使电气设备或器件遭受损坏。

因此，研究暂态过程的目的就是：认识和掌握这种客观存在的物理现象的规律，在生产上既要充分利用暂态过程的特性，同时也必须预防它所产生的危害。

第二节　换路定则

电路在特定条件下处于一种稳定状态，如果电路中电源改变，元件的参数改变、电路的结构以及电路的工作状态发生变化，该电路就会由原来的稳定状态进入另一种新的稳定状态。上述电路中种种条件的改变，就是电路发生所谓“换路”。

一般地讲，换路后过渡过程开始瞬间时刻，电路中各电容电压和电感电流统称为电路的初始条件，也称为电路的初始值。确定电路初始值的依据是换路定则。

一、换路定则的概念

在图 9-2(a)所示 RC 电路中，开关 S 闭合之前，电容两端的电压 $u_C=0$，电容器极板上的电荷 $q=0$，当 S 闭合时，由于电场能量 $W=\frac{1}{2}Cu_C^2$ 不能突变，所以电压 u_C 也就不能突变，因此，电容器两端的电压必须从 0 逐步变为 U。

在图 9-2(b)所示的 RL 电路中，开关 S 闭合之前，电路中的电流 $i_L=0$，电感线圈的磁通 $\Phi=0$，当 S 闭合时，由于磁场能量 $W=\frac{1}{2}Li_L^2$ 不能突变，所以电流 i_L 也就不能突变，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

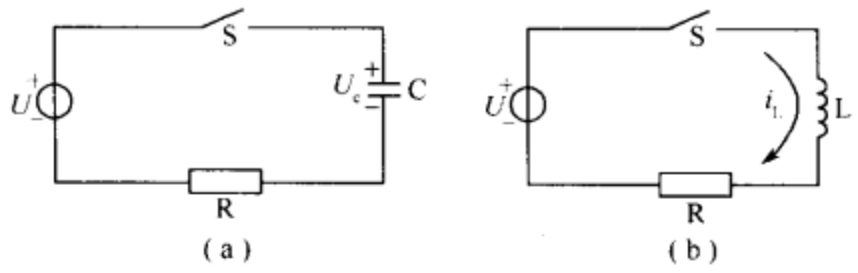


图 9-2　RC 和 RL 电路

(a)RC 电路；(b)RL 电路。

而必须从 0 逐步变为$\frac{U}{R}$。

为简便起见，认为换路是瞬间完成的，一般把换路瞬间取为计时起点，即取 $t=0$，并把换路前的终了时刻记为 $t=0_-$，换路后的初始时刻记为 $t=0_+$，则可得到如下结论：

在换路的一瞬间，如果流过电容的电流保持为有限值，则电容两端的电压应当保持换路前一瞬间的原有值而不能突变，即

$$u_C(0_+)=u_C(0_-) \tag{9-1}$$

对于一个原来没有电压的电容来说，在换路一瞬间，$u_C(0_+)=u_C(0_-)=0$，电容相当于短路。

在换路后的一瞬间，如果电感两端的电压保持为有限值，则电感中的电流应当保持换路前一瞬间的原有值而不能突变，即

$$i_L(0_+)=i_L(0_-) \tag{9-2}$$

对于一个原来没有电流的电感来说，在换路一瞬间，$i_L(0_+)=i_L(0_-)=0$，电感相当于开路。

以上结论，就是换路定则，换路定则仅适用于换路瞬间。

二、电路初始值的计算

电路的初始值就是换路后 $t=0_+$ 时刻的电压、电流值，可根据换路定则和基尔霍夫定律进行求解，方法如下：

①根据换路前稳态电路（$t=0_-$）的等效电路，计算出电容电压 $u_C(0_-)$ 和电感电流 $i_L(0_-)$，其他的电压、电流不必计算。因为换路时只有电容电压和电感电流维持不变。

②根据换路定则可以得到电容电压和电感电流的初始值，即 $u_C(0_+)=u_C(0_-)$、$i_L(0_+)=i_L(0_-)$。

③在 $t=0_+$ 的等效电路中，如果 $u_C(0_+)=0$，就将电容器 C 短路；若 $u_C(0_+)=U$，则用一个电压为 U 的电压源将电容代替。如果 $i_L(0_+)=0$，就将电感器 L 开路；若 $i_L(0_+)=I$，则用一个电流为 I 的电流源将电感代替。由 $t=0_+$ 的等效电路，利用稳态电路的分析方法，可以计算出电路的任一初始值。

需要说明的是，在换路瞬间，只是电容中的电压和电感中的电流不能跃变，而电容中的电流和电感上的电压是可以跃变的；至于纯电阻电路中，电流和电压都可以跃变。

重点提示：电容中的电流和电感中的电压

设电容器的电容为 C，两端电压为 u_C，通过电容器的电流为 i_C，则有如下关系式：

$$i_C = C\frac{du_C}{dt}$$

上式中，$\frac{du_C}{dt}$表示电容器两端电压的变化率，相当于$\frac{\Delta u_C}{\Delta t}$。当电容器两端的电压 u_C 不变时($\Delta u_C = 0$)，即电压的变化率为零，此时，$i_C = 0$；当电容器两端的电压 u_C 逐步增大时($\Delta u_C > 0$)，$i_C > 0$，u_C 从最小到最大变化得越快，i_C 越大；当电容器两端的电压 u_C 逐步减小时($\Delta u_C < 0$)，$i_C < 0$(即 i_C 反向)，u_C 从最大到最小变化得越快，反方向的电流 i_C 越大。

设电感器的电感为 L，流过的电流为 i_L，电感器两端的电压为 u_L，则有如下关系式：

$$u_L = L\frac{di_L}{dt}$$

上式中，$\frac{di_L}{dt}$表示流过电感器电流的变化率，相当于$\frac{\Delta i_L}{\Delta t}$，当流过电感器的电流 i_L 不变时($\Delta i_L = 0$)，即电流的变化率为零，此时，$u_L = 0$；当流过电感器的电流 i_L 逐步增大时($\Delta i_L > 0$)，$u_L > 0$，i_L 从最小到最大变化得越快，u_L 越大；当流过电感器的电流 i_L 逐步减小时($\Delta i_L < 0$)，$u_L < 0$(即 u_L 反向)，i_L 从最大到最小变化得越快，反方向的电压 u_L 越大。

例 1：如图 9-3(a)所示电路中，$U = 100\text{V}$，$R_2 = 100\Omega$，开关 S 原处于位置 1，电路达到稳态。试求开关 S 由位置 1 转到位置 2 时，电路中 R_1、R_2、C 的电压和电流初始值。

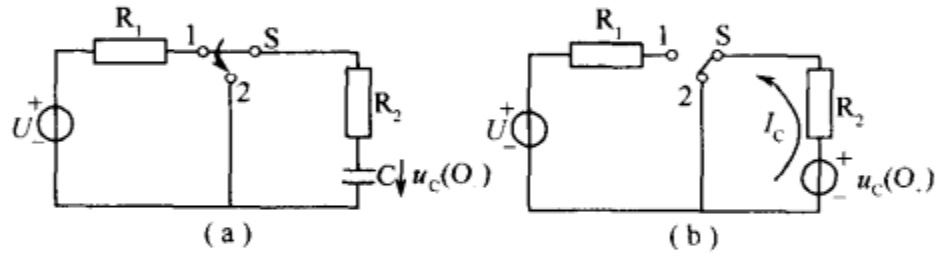


图 9-3　例 1 图

(a)换路前；(b)换路后。

解：第一步：根据换路前($t = 0_-$)的稳态电路，如图 9-3(a)所示，计算出电容电压 $u_C(0_-)$。由于电容在直流稳定状态下相当于开路，所以，换路前电容的电压为：

$$u_C(0_-) = U = 100\text{V}$$

第二步：当开关 S 转到 2 时，根据换路定则，可求出换路后电容电压 $u_C(0_+)$，则

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 100\text{V}$$

可见，换路后，电容相当于一个 100V 的电压源，因此，换路后($t = 0_+$)的等效电路如图 9-3(b)所示。

第三步：根据换路后的等效电路，运用稳态电路的方法求解。

设电流的参考方向如图 9-3(b)所示，根据基尔霍夫电压定律，可得：

$$u_C(0_+) - u_{R_2}(0_+) = 0$$

所以

$$u_{R_2}(0_+) = u_C(0_+) = 100\text{V}$$

$$i_{R_2}(0_+) = i_C(0_+) = \frac{u_{R_2}(0_+)}{R_2} = \frac{100}{100} = 1(\text{A})$$

对于 R_1，则有：

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$i_{R_1}(0_+)=0$$

$$u_{R_1}(0_+)=R_1 i_{R_1}(0_+)=0$$

例 2：如图 9-4(a)所示电路，开关 S 断开时，电路已处于稳态。已知 $U=10\text{V}$，$R_1=6\Omega$，$R_2=4\Omega$，求当开关 S 闭合后，i_1、i_2、i_3、u_L 的初始值。

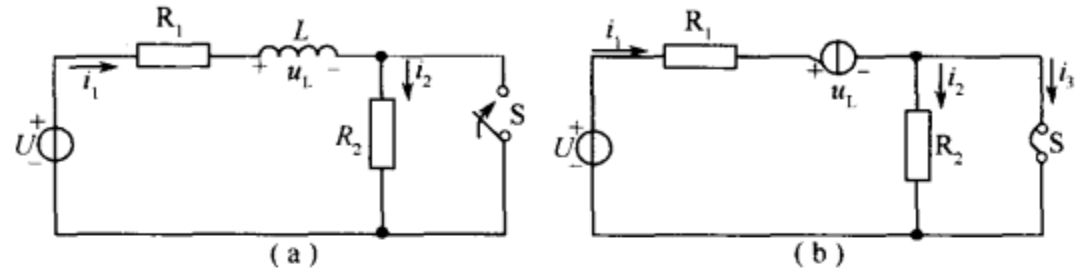


图 9-4　例 2 图

(a)换路前；(b)换路后。

解：第一步：根据换路前($t=0_-$)的稳态电路，如图 9-4(a)所示，计算出电感电流 $i_1(0_-)$。由于电感器在直流稳定状态下相当于短路，所以，换路前的电流：

$$i_1(0_-)=i_2(0_0)=\frac{U}{R_1+R_2}=\frac{10}{6+4}=1(\text{A})$$

$$i_3(0_-)=0$$

第二步：当开关 S 闭合时，根据换路定则，可求出换路后电感电流 $i_1(0_+)$为：

$$i_1(0_+)=i_1(0_-)=1\text{A}$$

可见，换路后，电感器相当于一个电流源，因此，换路后($t=0_+$)的等效电路如图 9-4(b)所示。

第三步：根据换路后的等效电路，运用稳态电路的方法求解。设电流和电压的参考方向如图 9-4(b)所示。

由于 R_2 被短路，所以：

$$i_2(0_+)=0$$

$$i_3(0_+)=1\text{A}$$

根据基尔霍夫电压定律可得：

$$U-i_1(0_+)R_1-u_L=0$$

所以：

$$u_L=U-i_1(0_+)R_1=10-1\times6=4(\text{V})$$

三、电路稳态值的计算

电路的稳态值是指换路后达到新的稳定状态时的电压、电流值，一般用 $u(\infty)$、$i(\infty)$ 表示。对于直流状态下的 RC、RL 电路，当电路达到新的稳定状态时，电容器相当于开路，电感器相当于短路。由此，可画出 $t=\infty$时的等效电路，再由直流电路的分析方法进行计算即可。

例 3：在前面图 9-3(a)所示电路中，$U=100\text{V}$，$R_2=100\Omega$，试求开关 S 由位置 1 转到

位置 2 后，达到稳定状态时 R_1、R_2、C 的电压和电流。

解：达到稳定状态时，电容器相当于开路，据此画出 $t=0$ 时的等效电路，如图 9-5 所示。

根据等效电路图可知，达到稳定状态时 R_1、R_2、C 的电压和电流均为 0。

例 4：在前面图 9-4(a)所示电路中，$U=10\text{V}$，$R_1=6\Omega$，$R_2=4\Omega$，求当开关 S 闭合后达到稳定状态时，i_1、i_2、i_3、u_L 的值。

解：达到稳定状态时，电感器相当于短路，据此画出 $t=\infty$ 时的等效电路，如图 9-6 所示。

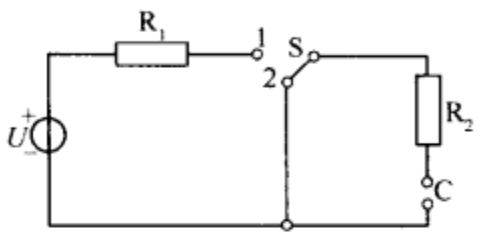


图 9-5　例 3 图

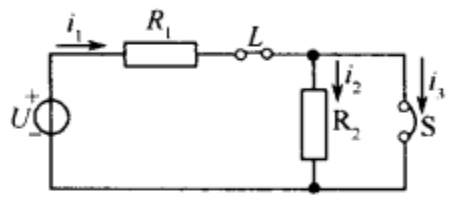


图 9-6　例 4 图

根据等效电路图可知：

$$i_1(\infty)=i_3(\infty)=\frac{U}{R_1}=\frac{10}{6}=1.67(\text{A})$$

$$i_2(\infty)=0$$

$$u_L=0$$

第三节　RC 电路充放电的过渡过程

一、RC 电路放电的过渡过程

如图 9-7 是 RC 串联电路，在换路前，开关 S 是合在位置 1 上的，电源对电容充电，充到 $u_C=U$，之后，在 $t=0$ 时，将 S 从位置 1 合到位置 2，使电路脱离电源，电容元件即经过电阻 R 开始放电，下面简要说明放电过程电路中的电压和电流随时间变化的规律。

当开关 S 从位置 1 合到位置 2 时，电容器开始放电，经推算，其两端电压 u_C 变化规律如下（$e=2.718$，是一个常数）：

$$u_C=Ue^{-\frac{t}{\tau}} \tag{9-3}$$

设放电电流的正方向如图 9-7 所示，经推算，放电电流的变化规律如下：

$$i=\frac{U}{R}e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{9-4}$$

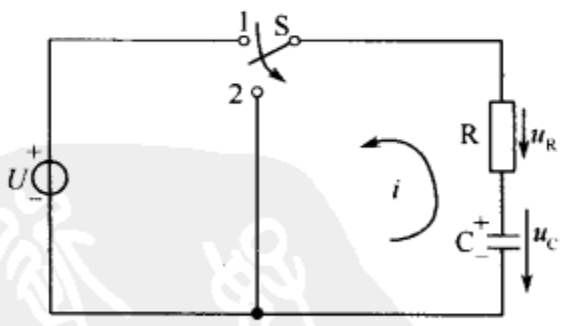


图 9-7　RC 电路放电的过渡过程

在式(9-3)和式(9-4)中：

$$\tau=RC \tag{9-5}$$

因为 τ 具有时间的量纲，所以，称它为 RC 电路的时间常数，时间常数 τ 的大小影响

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

u_C 及 i，决定电路放电时间的长短。τ 越大，则过渡时间越长。从物理意义上看，在 U 确定的情况下，τ 越大，说明电容、电阻大。电容越大，则储存的电荷越多；电阻越大，则放电电流越小，因此，放电时间就越长。反之，τ 越小，说明电容、电阻小，放电电流大，放电时间短。

在换路以后，当 $t=\tau$ 时，由式(9-3)可知，$u_C(\tau)=Ue^{-1}=\dfrac{U}{2.718}=0.368U$，以后，每经过一个时间常数 τ，电容电压就衰减到原值的 0.368 倍，即

$$u_C(2\tau)=0.368u_C(\tau)=0.135U$$

$$u_C(3\tau)=0.368u_C(2\tau)=0.05U$$

$$u_C(4\tau)=0.368u_C(3\tau)=0.018U$$

$$u_C(5\tau)=0.368u_C(4\tau)=0.007U$$

从理论上讲，电路只有经过 $t=\infty$ 的时间才能达到稳定，但实际上，经过 $t=5\tau$ 后，电容电压已衰减到原值的 0.7%，因此，一般认为，换路后时间经过 5τ，电容放电便基本结束，电容电压和电流变化曲线如图 9-8(a)、(b)所示。

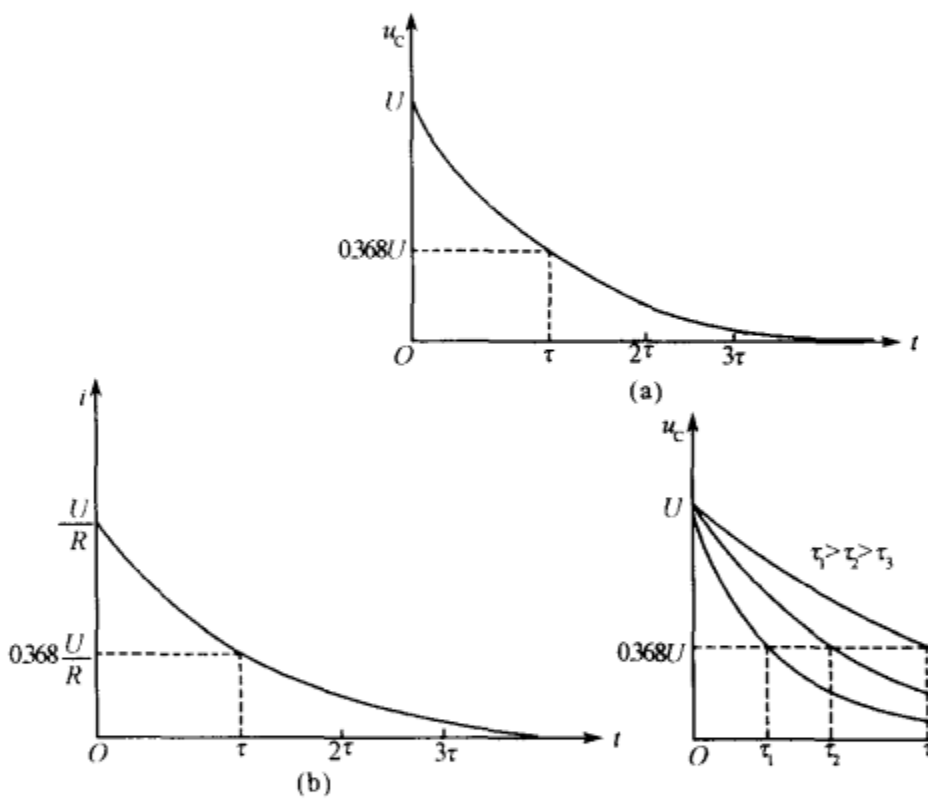


图 9-8　RC 电路放电波形图

电容放电的快慢可以通过改变电路的时间常数来达到，图 9-8(c)给出了三种不同时间常数下的 u_C 变化曲线。

例 5：如图 9-9 所示电路，开关 K 长时间合在位置 1 上，在 $t=0$ 时把它合到位置 2，求电容器 C 上的电压 u_C 及放电电流 i。已知 $R_1=1\text{k}\Omega$，$R_2=2\text{k}\Omega$，$R_3=3\text{k}\Omega$，$C=1\mu\text{F}$，电流源 $I=3\text{mA}$。

解：在 $t=0_-$ 时，电容器相当于开路，所以电容器两端的电压等于 R_2 两端的电压，即

$$u_C=IR_2=3\times10^{-3}\times2\times10^{3}=6(\text{V})$$

换路后，根据式(9-3)，可知电容器两端的电压为：

$$u_C=6e^{-\frac{t}{\tau}}=6e^{-\frac{1}{R_3C}t}=6e^{-\frac{1}{3\times10^{-3}}t}=6e^{-3.3\times10^{3}t}(\text{V})$$

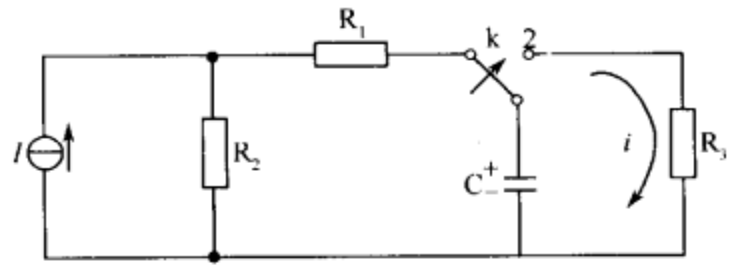


图 9-9　例 5 图

选定放电电流的正方向如图 9-9 所示，则换路后，根据式(9-4)，可知放电电流为：

$$i=\frac{6}{R_3}e^{-\frac{t}{\tau}}=\frac{6}{3}e^{-\frac{1}{R_3C}t}=2e^{-\frac{1}{3\times10^{-3}}t}=2e^{-3.3\times10^{3}t}(\mathrm{A})$$

例 6：如图 9-10(a)所示电路，开关闭合前电路已处于稳态，在 $t=0$ 时将开关闭合，试求开关闭合后 u_C 和 i_C。已知 $R_1=1\Omega$，$R_2=2\Omega$，$R_3=3\Omega$，$C=5\mu F$，电压源 $U=6V$。

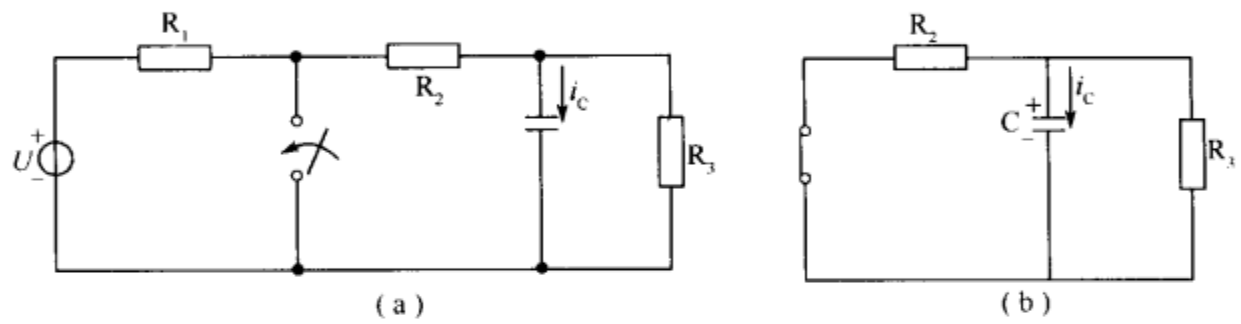


图 9-10　例 6 图

解：在 $t=0_-$ 时，电容器两端的电压等于 R_3 两端的电压，即

$$u_C=\frac{R_3}{R_1+R_2+R_3}\times U=\frac{3}{1+2+3}\times6=3(\mathrm{V})$$

换路后，6V 电源与 R_1 电阻串联的支路被开关短路，对右边的电路不起作用，等效电路如图 9-10(b)所示，这时，电容器经两只电阻支路放电，时间常数为：

$$\tau=RC=(R_2/\!/R_3)\times C=\frac{2\times3}{2+3}\times5\times10^{-6}=6\times10^{-6}(\mathrm{s})$$

根据式(9-3)，可知电容器两端的电压为：

$$u_C=3\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}=3\mathrm{e}^{-\frac{10^6}{6}t}=3\mathrm{e}^{-1.7\times10^5t}(\mathrm{V})$$

选定电流的正方向如图所示，则换路后，根据式(9-4)，可知放电电流为：

$$i_C=-\frac{u_C}{R_2/\!/R_3}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}=-\frac{3}{6/5}\mathrm{e}^{-1.7\times10^5t}=-2.5\mathrm{e}^{-1.7\times10^5t}(\mathrm{A})$$

i_C 为负值，说明放电电流方向与选定的正方向相反。

二、RC 电路充电的过渡过程

如图 9-11 是 RC 串联电路，当开关闭合时，开始对电容器进行充电，下面分两种情况进行分析。

1. 零状态

换路前，电路中所有储能元件均未储有能量，这是电路的零状态，即初始状态为零，对

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

于图 9-11 所示电路，即 $u_C(0_-)=0$。

当开关 S 合上时，电压源开始对电容器充电，经推算，在零状态下，电容器两端电压 u_C 变化规律如下：

$$u_C=U(1-e^{-\frac{t}{\tau}}) \qquad (9\text{-}6)$$

设充电电流的正方向如图 9-11 所示，经推算，充电流的变化规律如下：

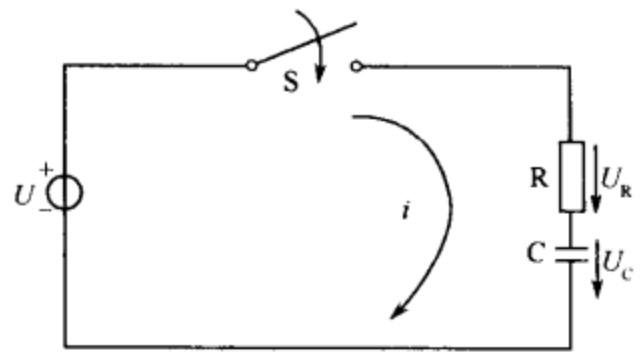


图 9-11　RC 电路充电的过渡过程

$$i=\frac{U}{R}e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (9\text{-}7)$$

在换路以后，当 $t=\tau$ 时，由式(9-6)可知，$u_C(\tau)=U(1-e^{-1})=U(1-0.368)=0.632U$。同理可得，$u_C(2\tau)=0.865U$，$u_C(3\tau)=0.95U$，$u_C(4\tau)=0.982U$，$u_C(5\tau)=0.993U$。

从理论上讲，电路只有经过 $t=\infty$ 的时间才能达到稳定，但实际上，经过 $t=5\tau$ 后，电容电压已上升到电压源 U 的 99.3%，因此，一般认为，换路后时间经过 5τ，电容充电便基本结束，电容电压 u_C、电阻电压 u_R 变化曲线如图 9-12(a)所示，电流 i 变化曲线如图 9-12(b)所示。

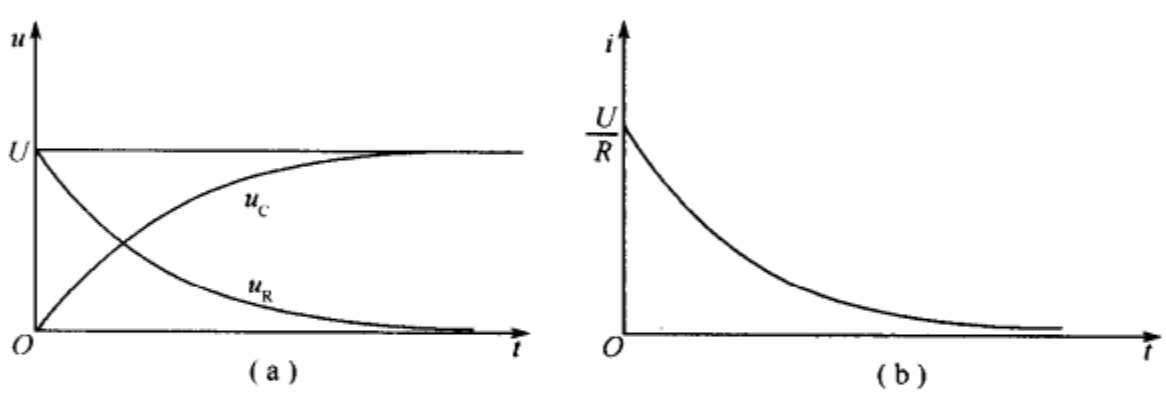


图 9-12　RC 电路充电波形图

电容充电的快慢可以通过改变电路的时间常数来达到。时间常数小，则充电快；时间常数大，则充电慢。

例 7：如图 9-13(a)所示电路，$U=9\text{V}$，$R_1=6\text{k}\Omega$，$R_2=3\ \text{k}\Omega$，$C=1000\text{pF}$，$u_C(0_-)=0$，求开关 S 闭合后，电容器 C 两端的电压 u_C。

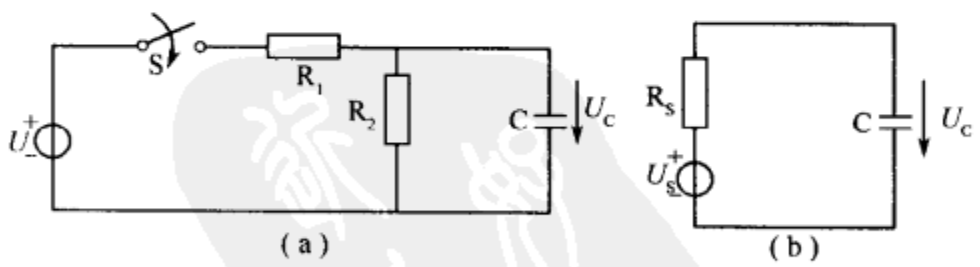


图 9-13　例 7 图

解：应用戴维南定理，将换路后的电路化为图 9-13(b)所示的等效电路。

等效电源的电动势为：

$$U_S=\frac{R_2}{R_1+R_2}U=\frac{3}{6+3}\times 9=3(\text{V})$$

等效电阻的内阻为：

$$R_S=R_1 /\!/ R_2=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{6\times3}{6+3}=2(\text{k}\Omega)$$

电路的时间常数为：

$$\tau=R_SC=2\times10^3\times1000\times10^{-12}=2\times10^{-6}(\text{s})$$

根据式(9-6)可得：

$$u_C=U_s(1-\text{e}^{-\frac{t}{\tau}})=3(1-\text{e}^{-\frac{t}{2\times10^{-6}}})=3(1-\text{e}^{-5\times10^5t})\text{V}$$

例 8：在图 9-14(a)所示的电路中，$R_1=3\ \text{k}\Omega$，$R_2=6\ \text{k}\Omega$，$C_1=40\mu\text{F}$，$C_2=C_3=20\mu\text{F}$，$U=12\text{V}$，开关 S 未闭合时各电容器处于零状态，求开关 S 闭合后的输出电压 u_C。

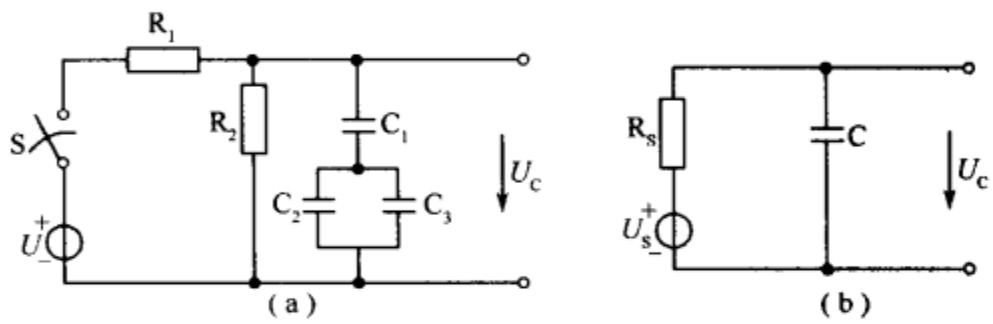


图 9-14　例 8 图

解：C_2、C_3 并联后再与 C_1 串联，其等效电容为：

$$C=\frac{C_1(C_2+C_3)}{C_1+(C_2+C_3)}=\frac{40(20+20)}{40+(20+20)}=20(\mu\text{F})$$

电路的其余部分可用戴维南定理化为图 9-14(b)所示的等效电路。

等效电源的电动势为：

$$U_s=\frac{R_2}{R_1+R_2}U=\frac{6}{3+6}\times12=8(\text{V})$$

等效电源的内阻为：

$$R_s=R_1 /\!/ R_2=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{3\times6}{3+6}=2(\text{k}\Omega)$$

由等效电路可得电路的时间常数为：

$$\tau=R_SC=2\times10^3\times20\times10^{-6}=40(\text{ms})$$

输出电压 u_C 为：

$$u_C=U_s(1-\text{e}^{-\frac{t}{\tau}})8(1-\text{e}^{-\frac{t}{40\times10^{-3}}})=8(1-\text{e}^{-25t})(\text{V})$$

2. 非零状态

换路前，电路中的储能元件已储有能量，这就是电路的非零状态。

对于图 9-11 所示电路，设在换路前，电容器已有 U_0 的电压，根据推算，可得出在换路后电容器的充电电压为：

$$u_C=U+(U_0-U)\text{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{9-8}$$

充电电流为：

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$i=\frac{U-U_0}{R}e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{9-9}$$

u_C、i 的波形如图 9-15 所示。

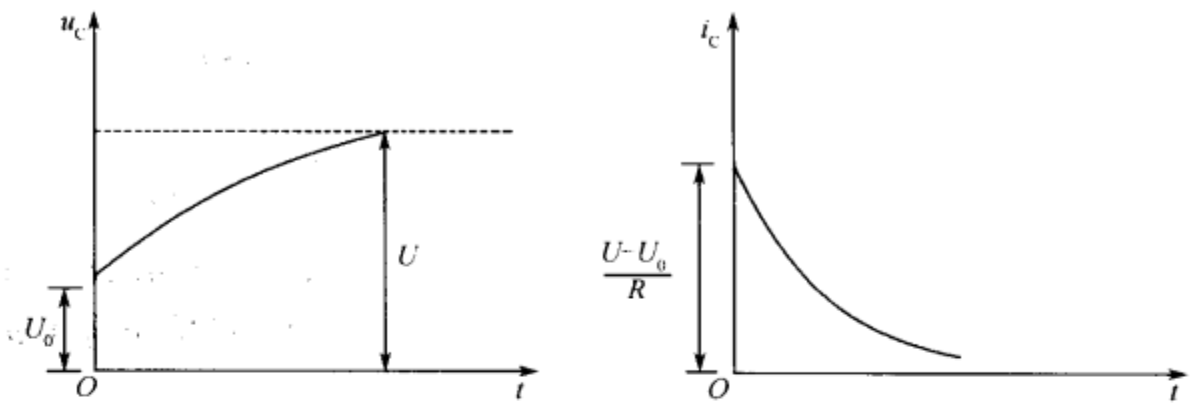


图 9-15　非零状态波形图

第四节　微分电路和积分电路

一、微分电路

微分电路如图 9-16(a)所示。

微分电路的主要作用是：当输入如图 9-16(b)所示的周期性矩形脉冲时，将输出图 9-16(c)所示的正、负尖顶脉冲。构成微分电路的条件是：输入脉冲的宽度 t_p 要比电路的时间常数 τ 大得多，即 $t_p \gg \tau$，下面简要说明微分电路的工作过程。

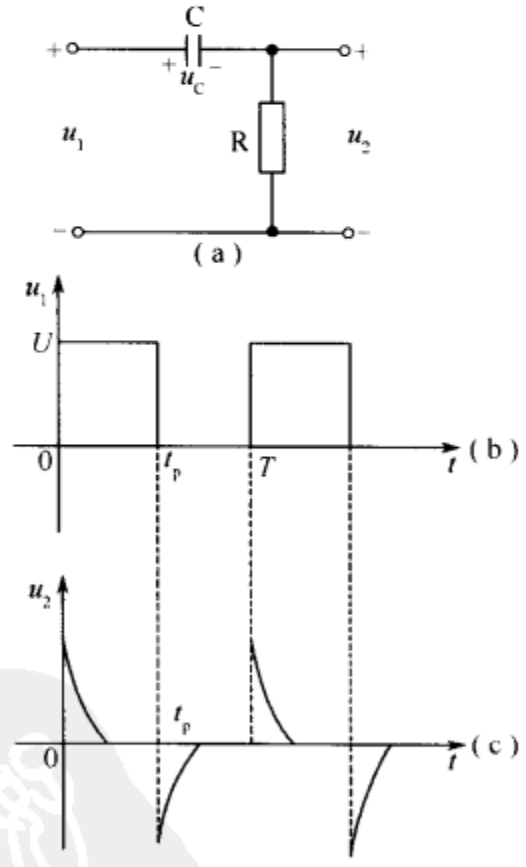


图 9-16　微分电路

当输入信号 u_1 脉冲出现这一瞬间，由于 C 两端的电压不能突变，所以 C 呈短路状态，这样脉冲加到 R 上，在 R 上的电压 u_2 最大。由于 R、C 时间常数 $\tau=RC$ 很小，因此，在脉冲未消失前，C 便充满了电荷，C 呈开路状态，无充电电流流过 R，所以 u_2 为零，这一过程产生如图 9-16(c)所示波形中的正尖顶脉冲，同时，这一过程给 C 充上左正右负的电压，电压大小为输入信号 u_1 脉冲的幅值 U。

当输入信号 u_1 脉冲消失这一瞬间，u_1 为零，即相当于输入端接地。由于电容两端的电压不能突变，在这一瞬间，R 上的电压 u_2 为负的最大电压($-U$)，即 C 上充到的左正右负电压，由于 C 左端接地，故 u_2 为负电压。很快 C 通过 R 放电完毕(因为 $\tau=RC$ 很小)，u_2 又为零，这样得到一个负尖顶脉冲。这一过程产生如图 9-16(c)所示的负尖顶脉冲波形。

当第二个脉冲到来时，在 R 上又获得正尖顶脉冲，当 u_1 脉冲消失时，又获得负尖顶脉冲。这样，通过微分电路，将 u_1 的矩形脉冲转换成了正、负尖顶脉冲。

二、积分电路

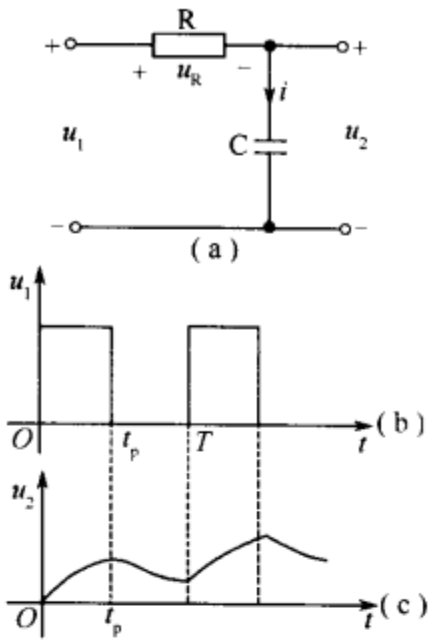


图 9-17　积分电路

图 9-17 为积分电路。

积分电路的主要作用是：当输入如图 9-17(b)所示周期性矩形脉冲时，将输出如图 9-17(c)所示的锯齿波。构成积分电路的条件与微分电路相反，要求电路的时间常数远大于脉冲宽度，即 $\tau \gg t_p$。下面简要说明积分电路的工作过程。

当输入的矩形脉冲信号 u_1 出现时，u_2 产生的电流通过 R 对 C 充电，使 C 上的电压 u_2 逐渐增大。当脉冲过去后，u_1 为零，C 上已充到的电压经 R 放电。由于时间常数 $\tau = RC$ 很大，放电缓慢，很快，第二个脉冲又到来，对 C 充电，使 u_2 增大。从图 9-17(c)所示波形中可以看出，输入脉冲愈密集，u_2 愈大。

第五节　RL 电路的过渡过程

一、与恒定电压接通

如图 9-18(a)为 RL 串联电路，在开关 S 未闭合时，电感器中未储有能量，将开关 S 闭合后，电路与一恒定电压为 U 的电压源接通，此时，根据推算，电感器两端的电压 u_L 和电路中电流 i 为：

$$u_L = U e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{9-10}$$

$$i = \frac{U}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \tag{9-11}$$

在式(9-10)、式(9-11)中，$\tau = \frac{L}{R}$ 它也具有时间量纲，称为 RL 电路的时间常数。u_L 和 i 变化曲线如图 9-18(b)、(c)所示。

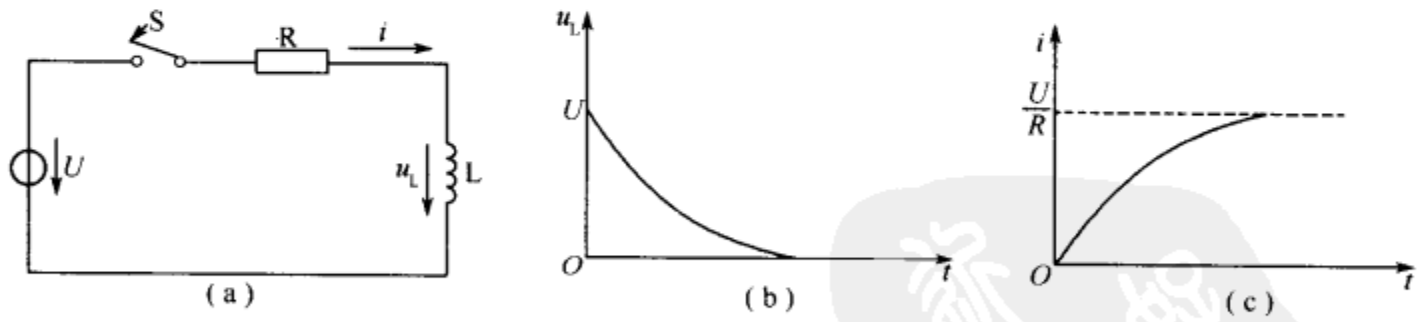


图 9-18　与恒定电压接通

二、短路与断开

如图 9-19(a)所示电路，换路前，开关 S 与 2 接通，电路处于稳态，此时，电感器中的电流 $I = \frac{U}{R}$，电感器储存了磁场能量；在 $t = 0$ 时，将开关 S 从位置 2 合到位置 1，电路变成了图 9-19(b)所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

由于电感器中的电流不能突变，所以电感电流的初始值为 $i_L(0_+)=i_L(0_-)=\frac{U}{R}$，随后，电感器中的储能不断通过电阻 R 进行释放，L 越大，电感器储能越多，能量释放所需时间越长，R 越大，能量衰减越慢。

经推算，当开关 S 从位置 2 合到位置 1 时，若选定如图 9-19(a)所示的方向为正方向，则电感器中的电流 i_L 和电压 u_L 变化规律为：

$$i_L=\frac{U}{R}e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{9-12}$$

$$u_L=-Ue^{-\frac{t}{\tau}} \tag{9-13}$$

式中，u_L 为负值，说明电感的电压方向与实际的参考方向相反。i_L 和 u_L 的变化曲线如图 9-19(c)、(d)所示。

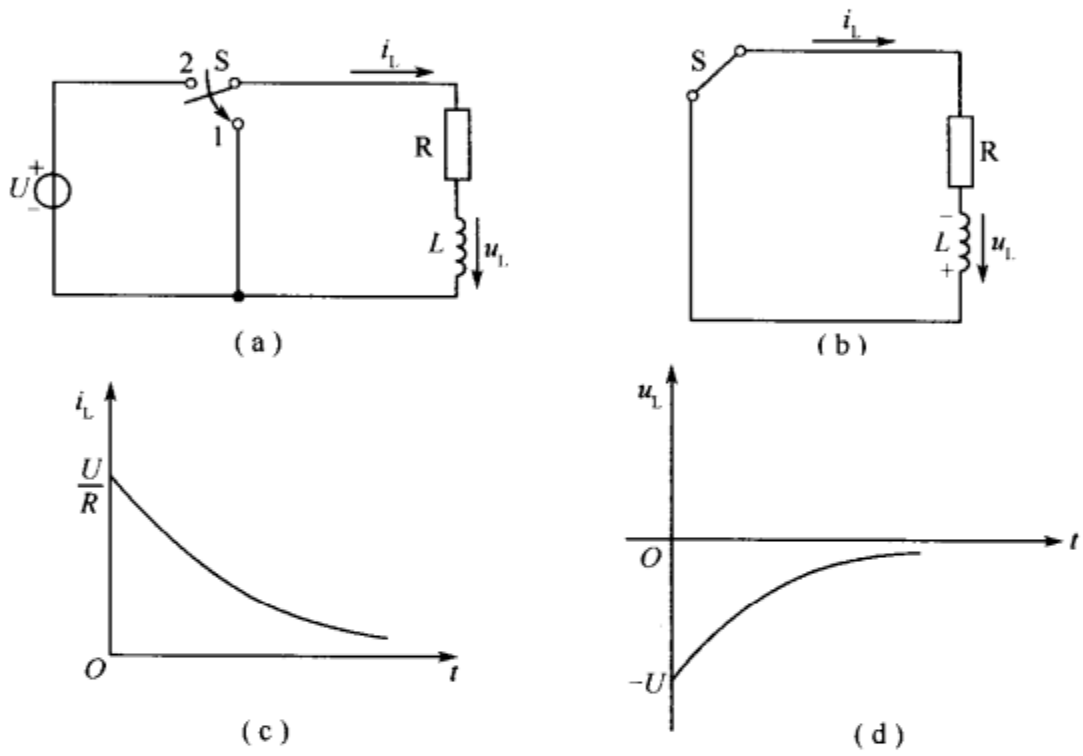


图 9-19　RL 电路的短路

在图 9-19(a)所示电路中，若开关 S 从电源断开而未加以短路，则这时电流的变化率 $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ 很大，致使线圈产生的自感电动势（$e_L=L\frac{\Delta I}{\Delta t}$）很大，这个自感电动势将使开关两触点之间的空气击穿而产生电弧，造成开关触点被烧坏。所以，往往将线圈从电源断开的同时，也将线圈加以短路，以便使电流逐渐减小。有时还可采取其他保护措施，如在线圈两端并联续流二极管，或接入阻容吸收电路，如图 9-20 所示。

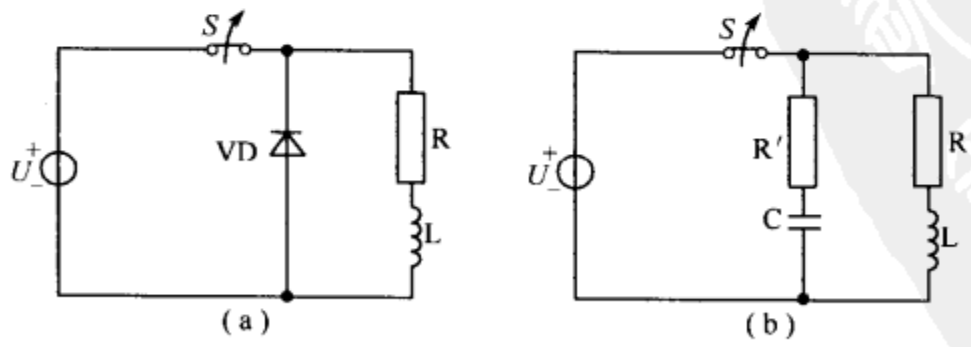


图 9-20　RL 保护电路

第十章　Edison 仿真软件及其在电路基础实验中的应用

用电路仿真软件做电路基础实验，不但可节约实验板和实验仪器的开支，避免实验板和仪器的损坏，而且方便直观、快速高效。电路仿真软件较多，常用的有 Edison、Multisim 等。Edison 简单易用，生动活泼，主要适合初学者；而 Multisim 则功能强大，使用复杂，适合有一定基础的电子爱好者。本书暂对 Edison 进行介绍，想要了解 Multisim 的读者，可参考本丛书中的《从零开始学电路仿真 Multisim 和电路设计 Protel 技术》一书。

第一节　Edison 仿真软件的基本使用方法

学习电路基础，不仅需要了解理论知识，更重要的是通过实际操作和实验来加深对内容的理解。传统的电路基础实验，常常是先制作一块模拟实验板，在这块板上用实验仪器对其进行实验和调试。制作实验电路板是一个艰苦复杂的过程。面对大量的元件和连线，每一个元件参数的确定可能要做多次实验，更要记录数据和描绘波形。在此过程中，如果缺乏实验仪器和实验设备的话，很多实验是无法进行的。如没有昂贵的示波器，就无法测量波形；没有昂贵的扫频仪，就无法测量电路的频率响应曲线；没有恒温箱，则不能测量电路的温度特性等。现在，电子计算机技术为电子设计提供了新的、强有力的辅助手段——电子设计自动化（简称 EDA）技术。电子设计自动化可以提供从集成电路到电路系统的设计和仿真工具。EDA 的重要组成部分之一———电路仿真技术，是以电路理论、数值计算方法和计算机技术为基础实现的，它采用数学模型和仿真算法，利用计算机高性能的计算、存储和图形处理能力，无需任何实际元器件，用预先设计出的专门程序，取代绝大多数的普通电学仪器仪表和实际电路。电路仿真软件不仅可以帮助读者加深对概念、原理的理解，而且通过电路仿真，可以熟悉常用电子仪器的测量方法，进一步培养学生的综合分析能力、排除故障能力和开发、创新能力。

当然，软件仿真并不能完全代替具体的操作实验。特别是在初学阶段，实验的过程本身就是一个培养学生实际动手操作能力的过程，而这一过程，用计算机软件模拟实验是不能替代的。因此，在使用电路仿真软件之前，建议读者应对有关电子元器件、实验仪器、电路连线方法和焊接技巧有较为深刻的认识和了解，并清楚电路实验的正确操作规范和实验程序步骤等。

一、Edison 简介

Edison 是匈牙利 Designsoft Inc. 公司设计推出的电子电路仿真分析、设计软件，非常适合初学者和电子爱好者使用。Edison 以实体的零件造型让初学者有置身于真实电

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

路实验室的感觉，加上有趣的声、光效果，让初学者在不知不觉中学习电路基础知识；同时，可以弥补实验仪器、元件少的不足，以及避免仪器、元器件的损坏。

Edison 已从 Edison2.0 发展到 Edison4.0。本书以最新版 Edison4.0 为例进行介绍。

Edison4.0 安装完成后，通过开始菜单，可启动 Edison4.0，启动后的画面如图 10-1 所示。

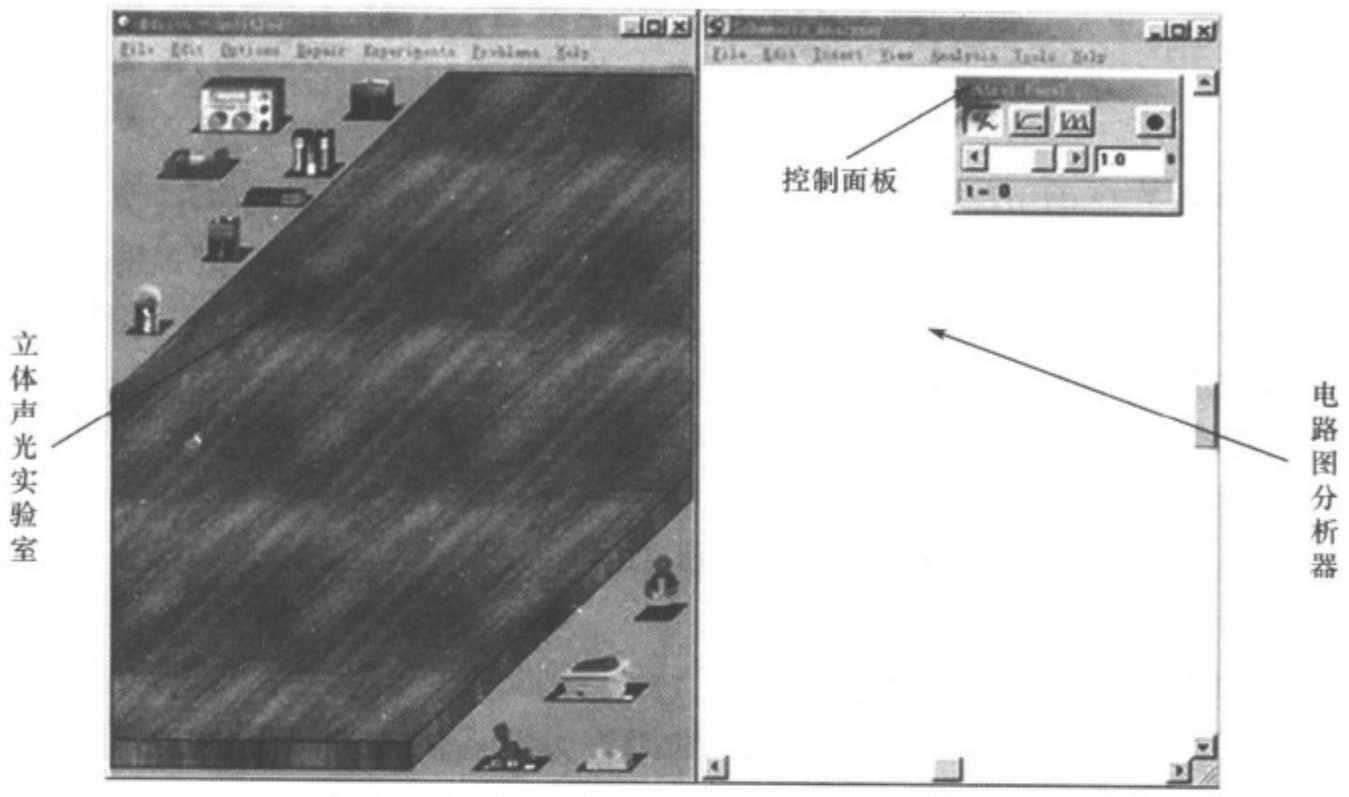


图 10-1　Edison4.0 启动后的画面

从图中可以看出，Edison4.0 由三个视窗组成，左边视窗是主界面，为元器件实物图及实物连接界面；右边视窗是电路图分析器，是在主界面里连接好实物图后，随即产生相应电路图的界面；右边上方的小视窗是控制面板。

Edison4.0 是一种新型的仿真软件，电路中元件的图形是立体的，可以直接通过鼠标点选拖拽来移动，以组成相应的电路。电路工作时，灯泡、LED 会发光，喇叭会发声，电动机会旋转。随着外加电压的增加，灯泡会点燃得更亮，电动机会转得更快，甚至听到马达的转动声音。改变元件的参数，就可变更电路方案，电阻标识的彩色条形码(或数值)也会自动地改变。如果外加的电压太高，还可演示灯泡烧毁。当然，烧毁的灯泡，及其他损坏的元件，只需用修复功能复原即可。在电脑上，还可引用仪表来测量电路的参数，以及发现和验证电路的定律。

在本书附赠的光盘中，有该软件的演示版，演示版不能进行保存和打印操作，另外也不支持复杂电路的实验演示。除此之外，其栩栩如生的 3D 电路元件，过载引起灯泡损坏，以及所伴随的声响，确实令人有耳目一新之感。该演示版非常适合初学者学习和使用。

二、Edison4.0 的立体声光实验室

Edison4.0 左边的视窗被称为立体声光实验室，这是因为该视窗里的实体电子元器件、仪表以及工作台都是立体的，给人一种强烈的真实感。

在立体声光实验室里，可进行动态的实验，如发声、转动、闪光等。不但可进行基本电

路实验，还可进行模拟电子和数字电子技术实验。立体声光实验室如图 10-2 所示，它由菜单、元件和仪器库以及实验工作台三大部分组成。

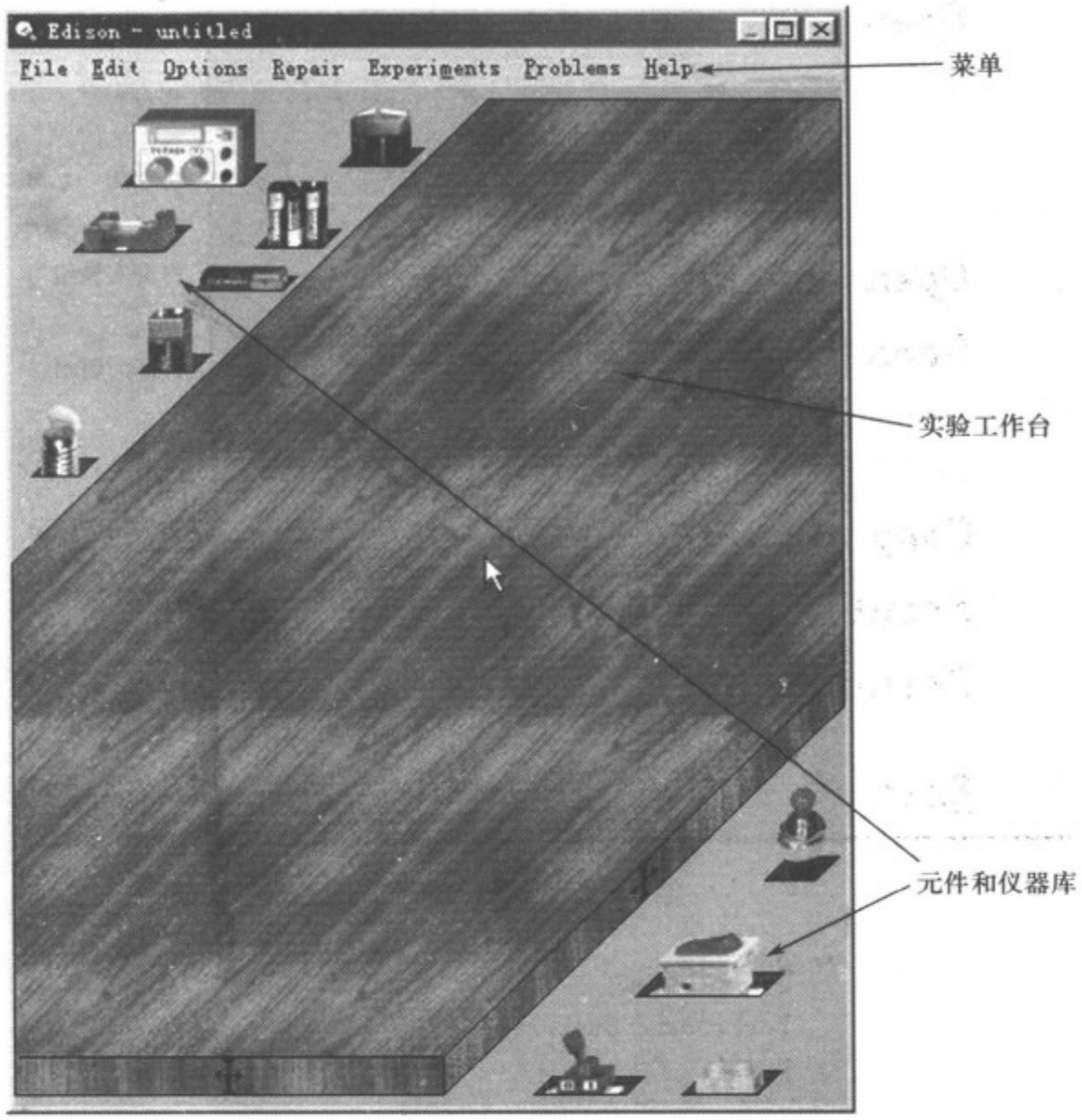


图 10-2　立体声实验室

1. 菜单命令

Edison4.0 菜单命令比较简单，包括文件、编辑、选项、修复、实验、问题和帮助七个子菜单，如图 10-3 所示。



图 10-3　Edison4.0 的菜单

文件菜单主要包括新建、打开、保存、另存为、打开实验组、打开问题组、导出、复制到剪贴板、打印、打印设置和退出等命令，如图 10-4 所示。

编辑菜单中包括选择部件架、背景图片、宏、修改参数、删除、全部修复和重新绘制等命令，如图 10-5 所示。

在编辑菜单中，Select shelf(选择部件架)和 Macro(宏)中还有子菜单，关于宏的具体使用，本书不作详细介绍。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

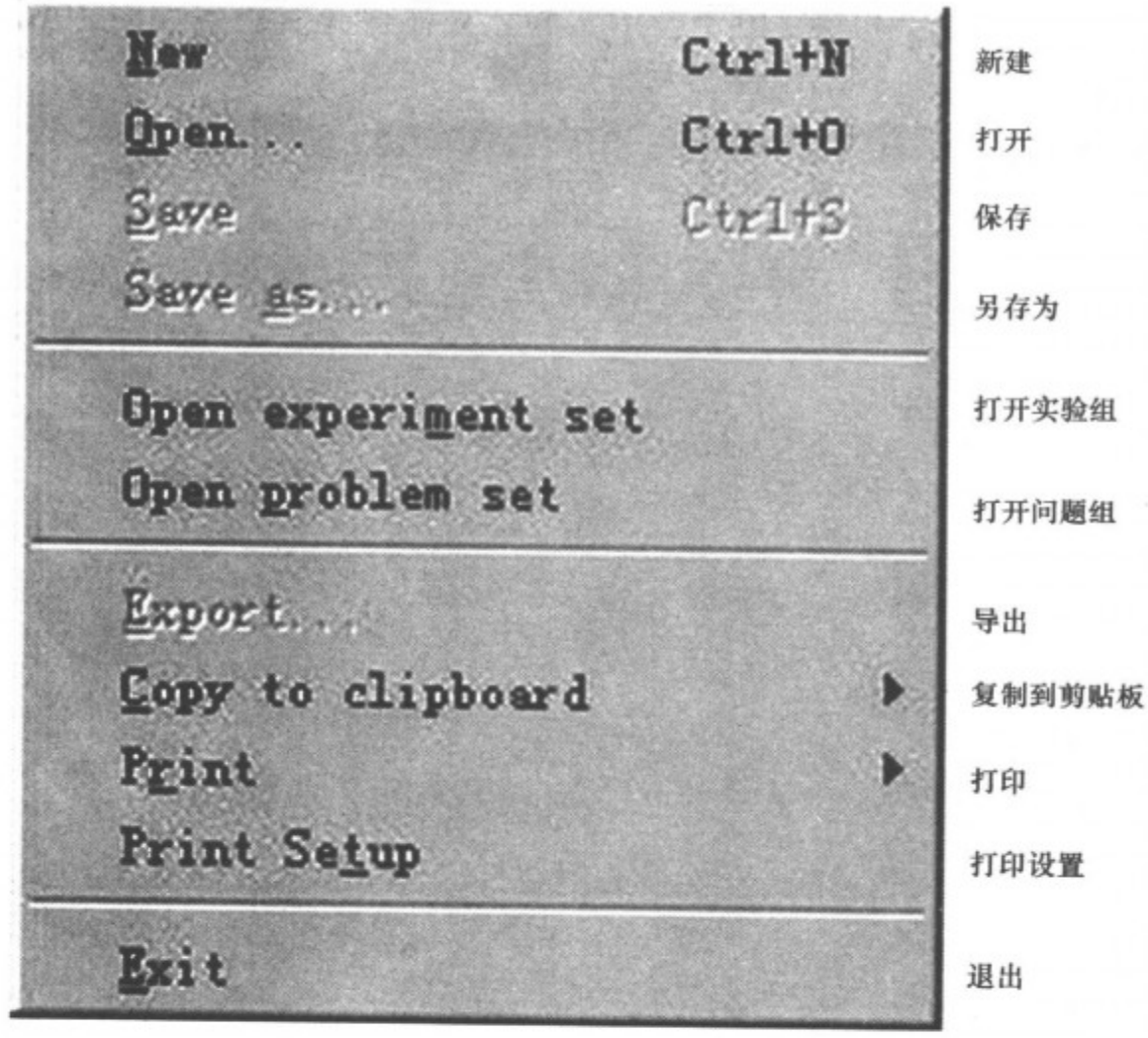


图 10-4　文件菜单

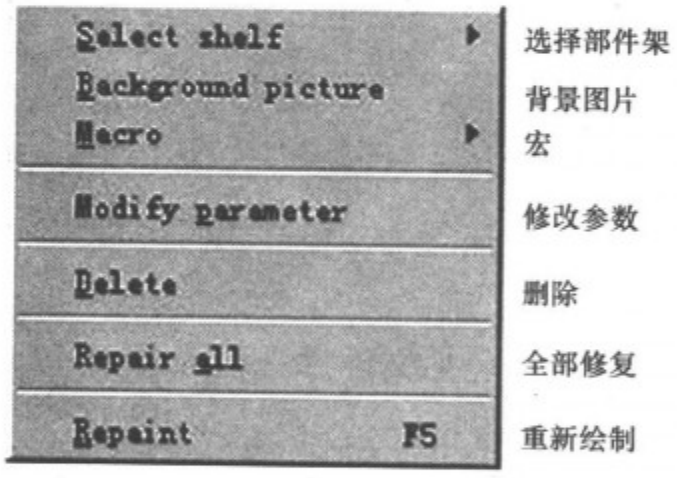


图 10-5　编辑菜单

选项菜单中包括声音效果、显示故障、移动时持住线、部件架上的提示、电路上的提示等命令，如图 10-6 所示。

在选项菜单的“声音效果”中还有子菜单，如图 10-7 所示。

如果再选中弹出部件架、电机、短路、烧坏或扬声器，即前面有“√”，则设定电路发出声音，若未选中，表示不发出声音。其他效果用于设定其他操作时是否发出声音，如果本项左边打“√”，代表其他操作时将发出声音。关闭所有效果用于设定为静音状态，不发出任何声音。

此外，在立体声光实验室视窗中还有修复、实验、问题、帮助四个菜单，修复菜单用于修复电路的故障；实验菜单用于进入各项实验项目；问题菜单用于进入各项测验问题；帮助菜单里提供 Edison4.0 操作的各项说明。

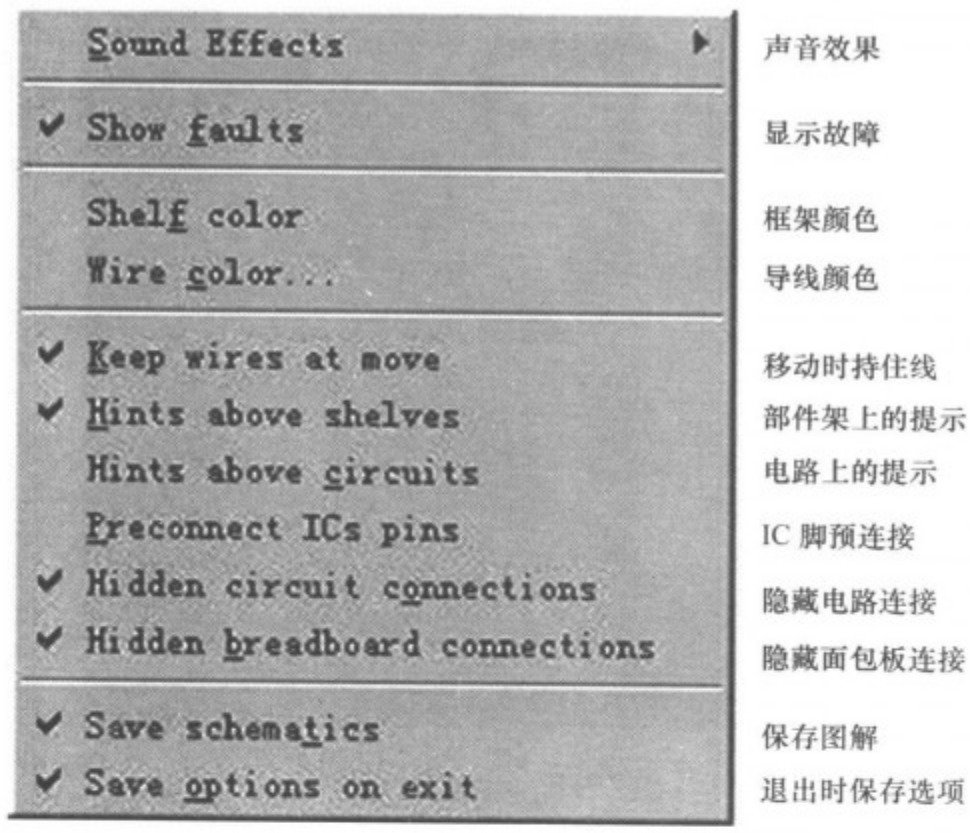


图 10-6　选项菜单

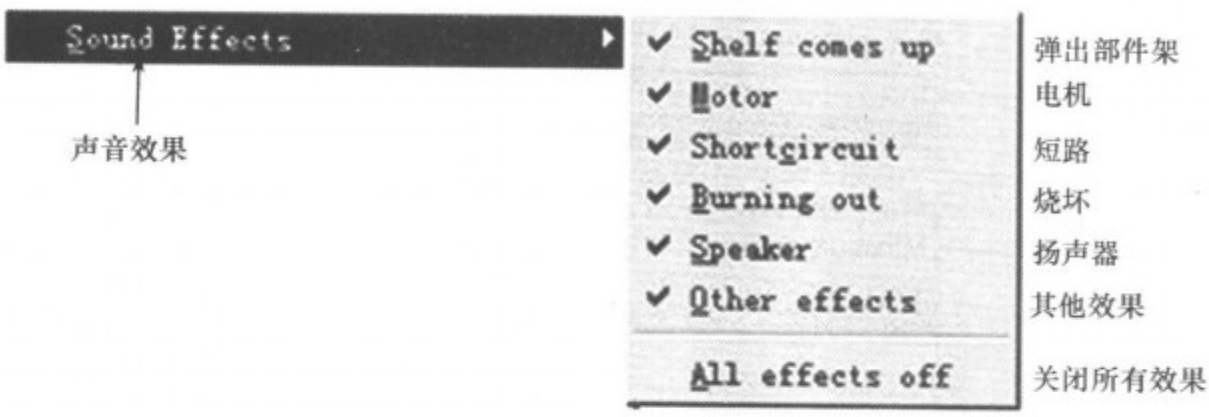


图 10-7　“声音效果”的子菜单

2. 元件和仪器库

在立体声光实验室里，左上角和右下角是元件和仪器库，里面提供了包括灯泡、电源、熔断丝、电位器、开关、电容、电感线圈、电阻、马达、喇叭、二极管、三极管、门电路和触发器等常用实体电子元器件。此外，还有信号发生器、示波器、信号分析器、万用表、欧姆表、伏特表和安培表等测量仪器。用鼠标在元件和仪器库中每点击一次，里面的元件或仪器将更新一次。下面分别介绍元件和仪器库的各类元件和仪器。

(1)电源类元件库

电源类元件库主要有可调电源、1.5V、4.5V 和 9V 电池以及熔断丝和灯泡，如图10-8所示。

Edison4.0 的每个部件都有一个或更多的参数供用户修改，修改的方法是：先把部件移到实验工作台，然后移动鼠标到部件上，当鼠标箭头右边出现“?”图标时，双击右键，即可弹出属性对话框。

对于可调电源，通过其属性对话框，可对其内部电阻、实际电压、电压步幅、最大电压和最小电压等属性进行调整，如图 10-9 所示。

对于电池，通过其属性对话框，可对其内阻进行调整；对于灯泡，通过其属性对话框，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

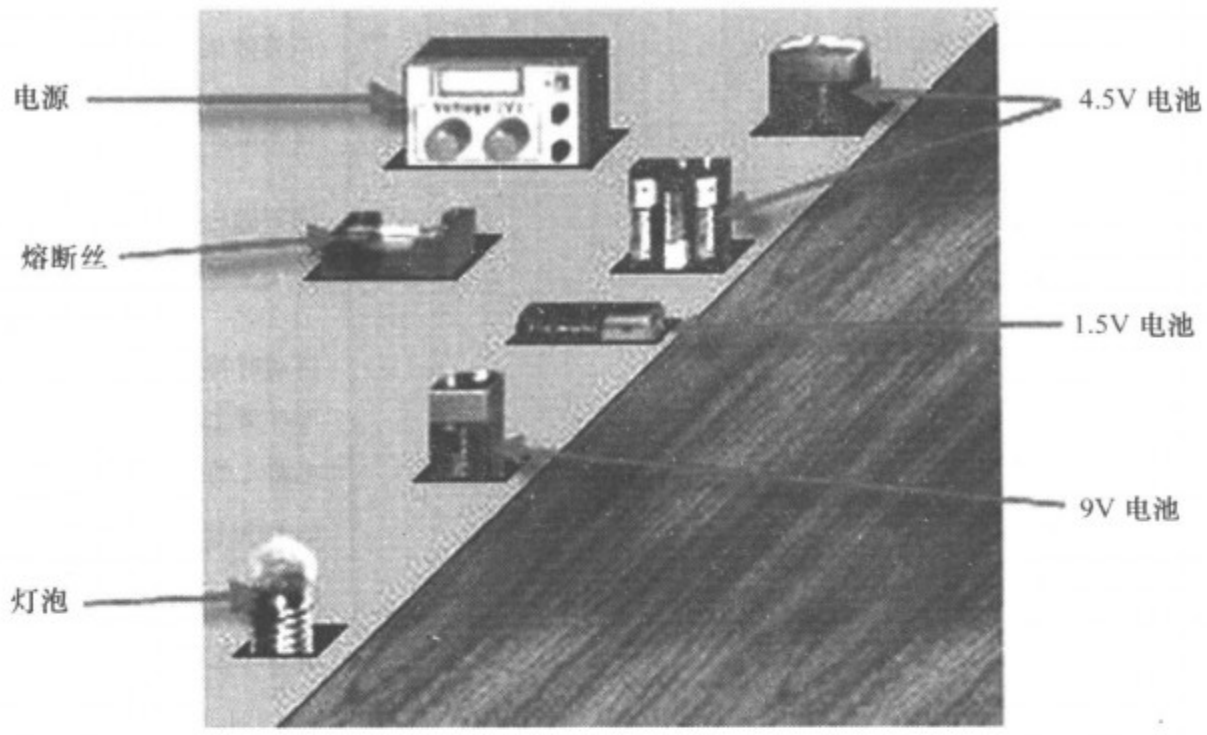


图 10-8　电源类元件库

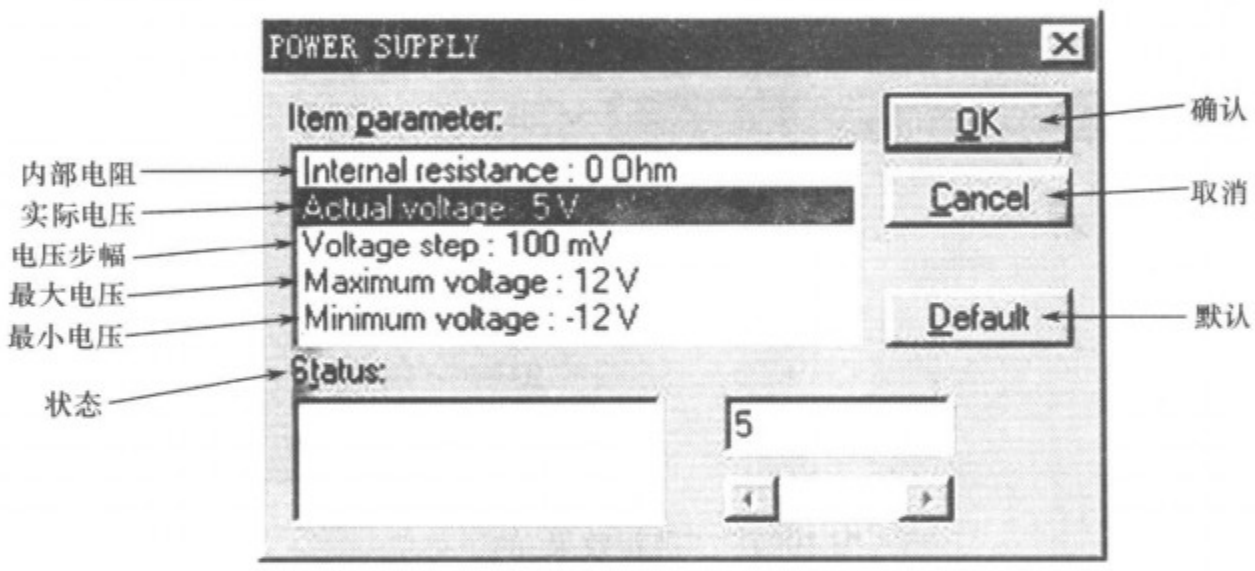


图 10-9　可调电源的属性对话框

可对其额定功率和额定电压进行调整；对于熔断丝，通过其属性对话框，可对熔断丝的最大电流、电压降和额定电流进行调整。

(2)常用元器件库

常用元器件库主要有电动机、电位器、电阻、电容器、电感器等，如图 10-10 所示。

对于电机，通过其属性对话框，可对额定功率和额定电压进行调整。

对于电位器，通过其属性对话框，可对实际电阻值、电阻步幅和最大电阻值进行调整，如图 10-11 所示。

对于电阻，其阻值有两种表示方法：一种是直接标出电阻值，另一种通过色环进行标注。通过电阻的属性对话框，可对电阻的公差、电阻值和功率进行调整，如图 10-12 所示。

对于电容器和电感器，通过其属性对话框，可对其电容和电感进行调整。

(3)扬声器和仪器库

扬声器和仪器库有扬声器、信号发生器、示波器和信号分析器(扫频仪)，如图 10-13 所示。

扬声器可通过其属性对话框，对其阻抗进行调整。

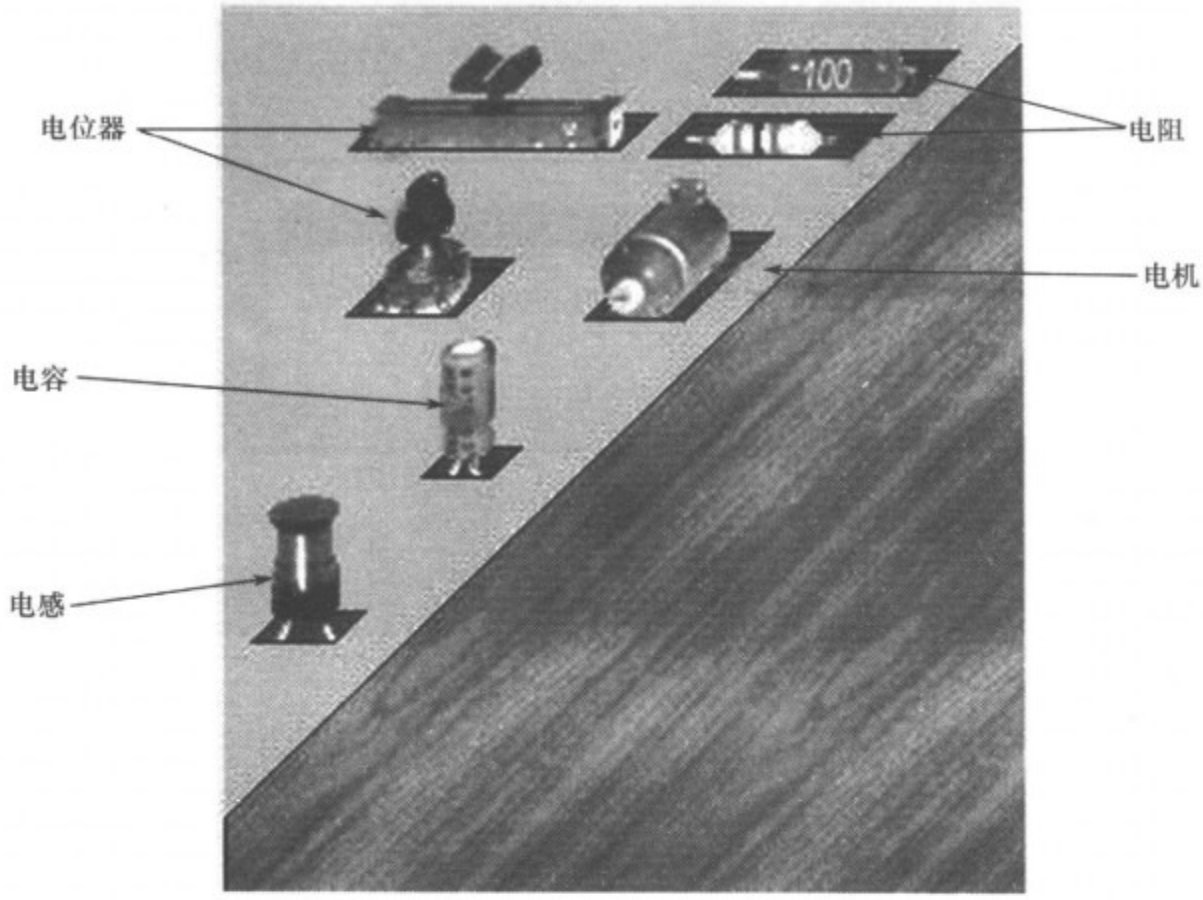


图 10-10　常用元器件库

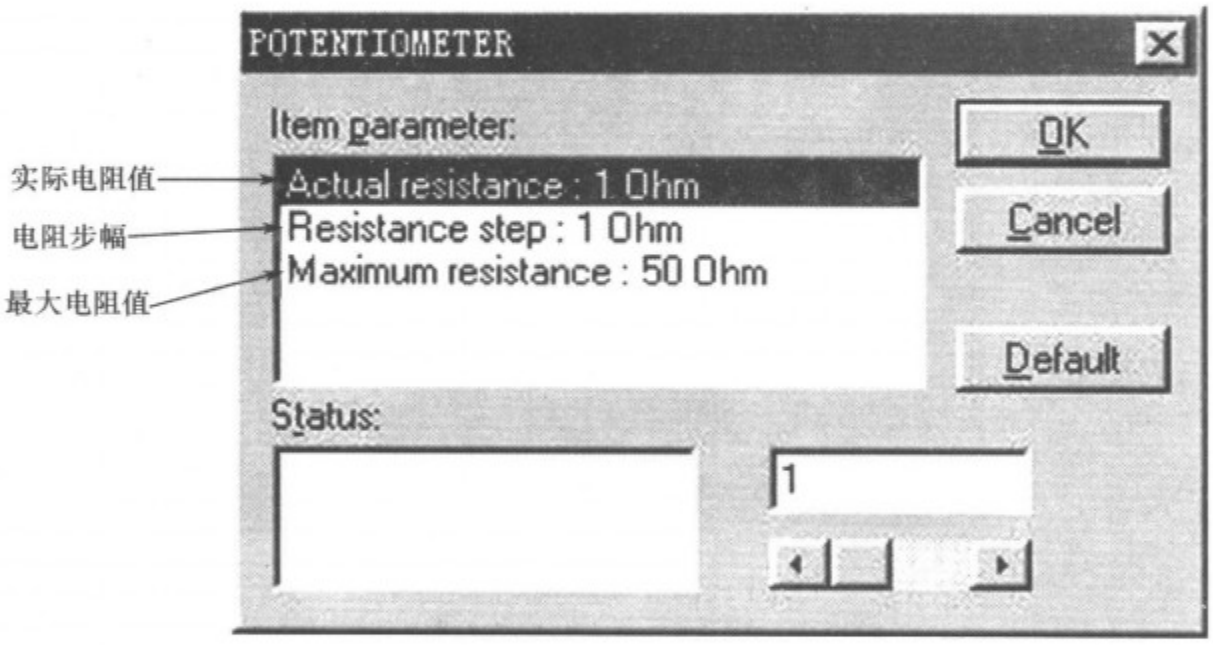


图 10-11　电位器的属性对话框

信号发生器用来产生一定频率、幅度和相位的正弦波信号。信号发生器的面板如图 10-14 所示。

双击信号发生器，可进入信号发生器的属性对话框，如图 10-15 所示。可调整的内容从上到下依次是：当前频率、频率步幅、最大频率、最小频率，当前相位移、相位移步幅、最大相位移、最小相位移，信号形式、当前电压、电压步幅、最大电压和最小电压。

示波器为双踪示波器，能同时显示两个通道 A 和通道 B。示波器的面板如图 10-16 所示。

双击示波器，可进入示波器的属性对话框，如图 10-17 所示。

属性对话框中可对 A 通道最大电压幅度、A 通道起点移动、B 通道最大电压幅度、B 通道起点移动和总时间进行调整。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

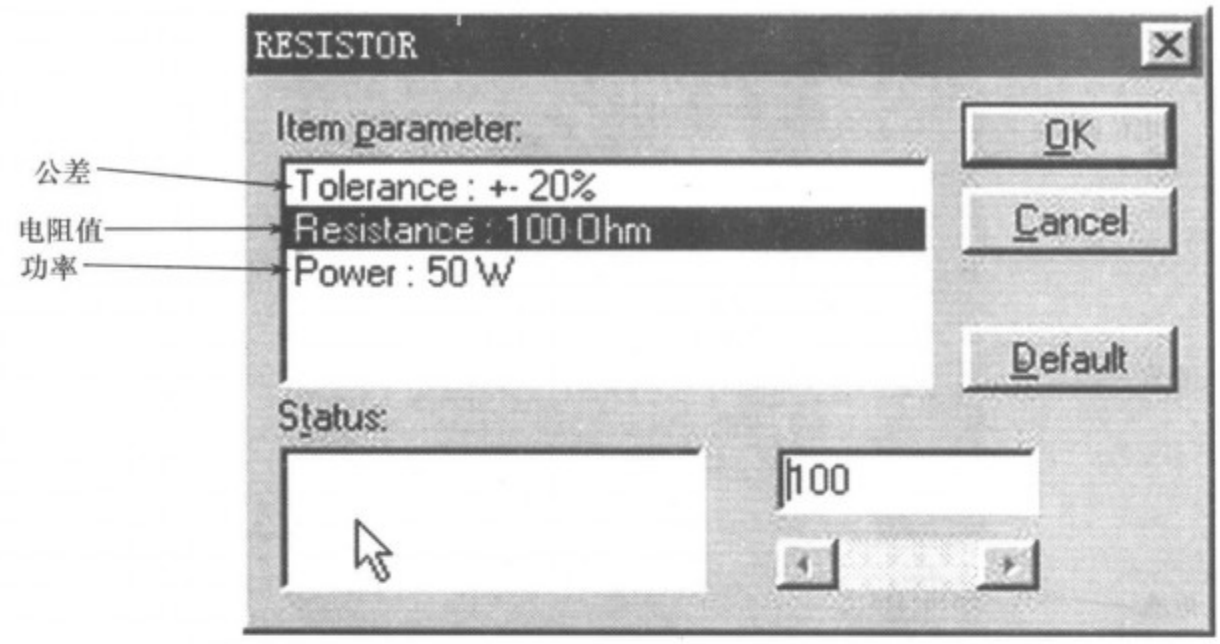


图 10-12　电阻的属性对话框

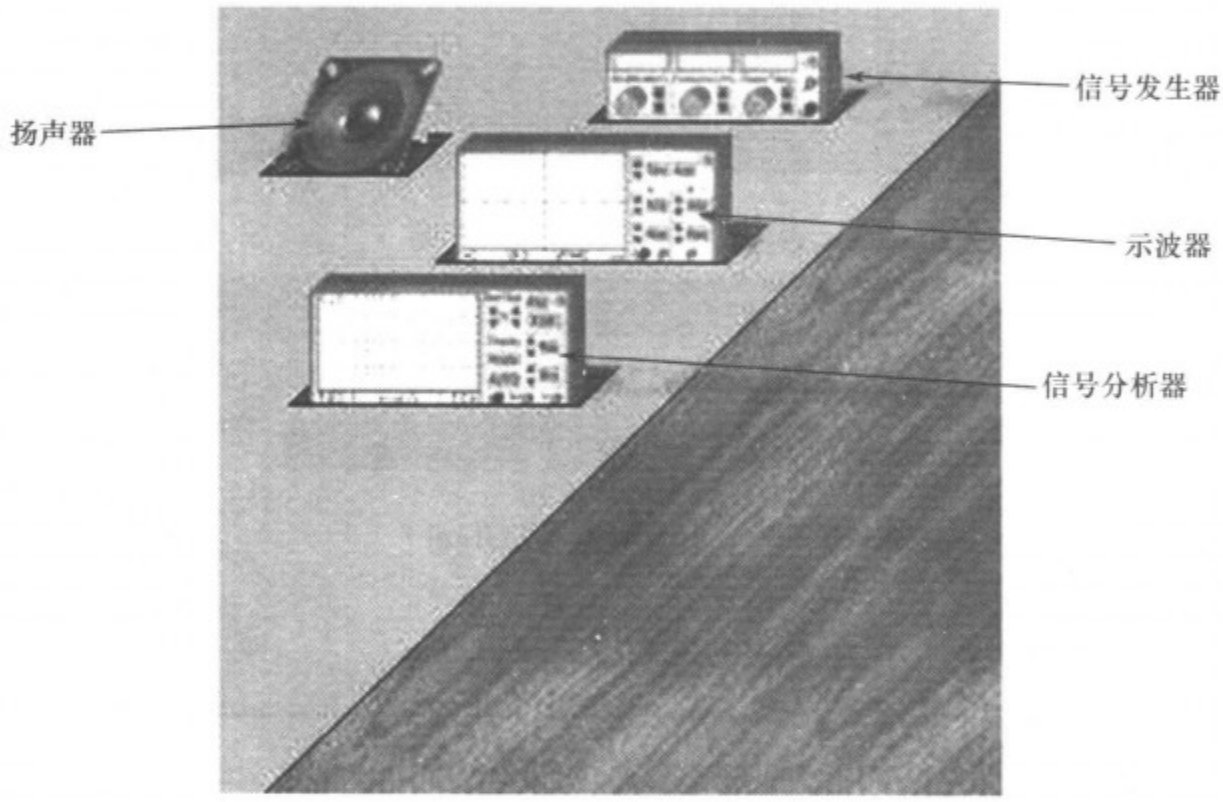


图 10-13　扬声器和仪器库

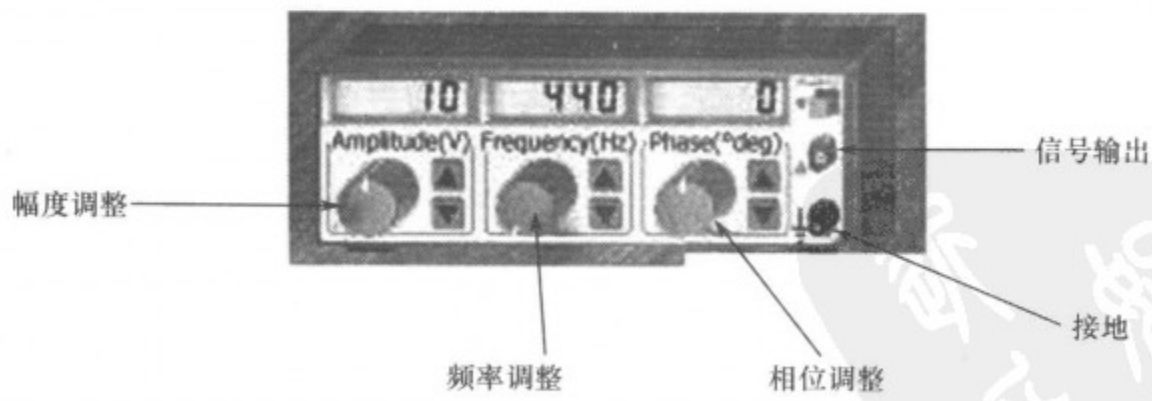


图 10-14　信号发生器面板

示波器上的“AUTO”为自动按钮，当这个按钮被按下时，系统会自动设置好输出结果的显示幅度、起点以及两个通道的时间。

信号分析器也称扫频仪，用于获得电路的 AC 传输特性曲线。它能按指定的信号幅度从起始频率到终止频率产生一系列正弦曲线测试信号。频率变化的数量是由指定的采

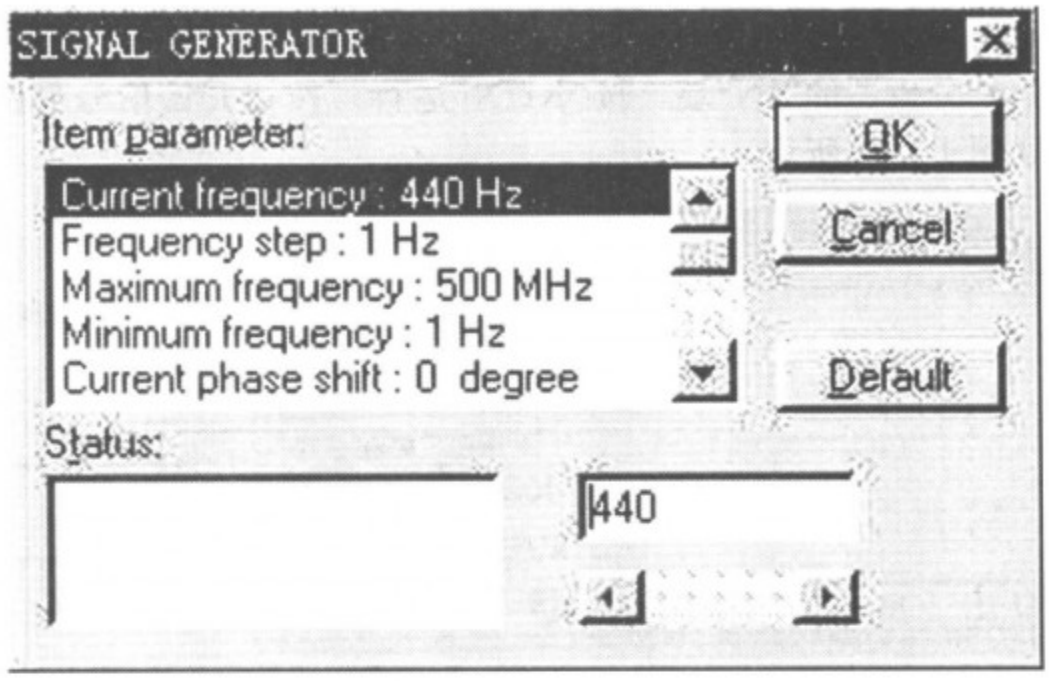


图 10-15　信号发生器属性对话框

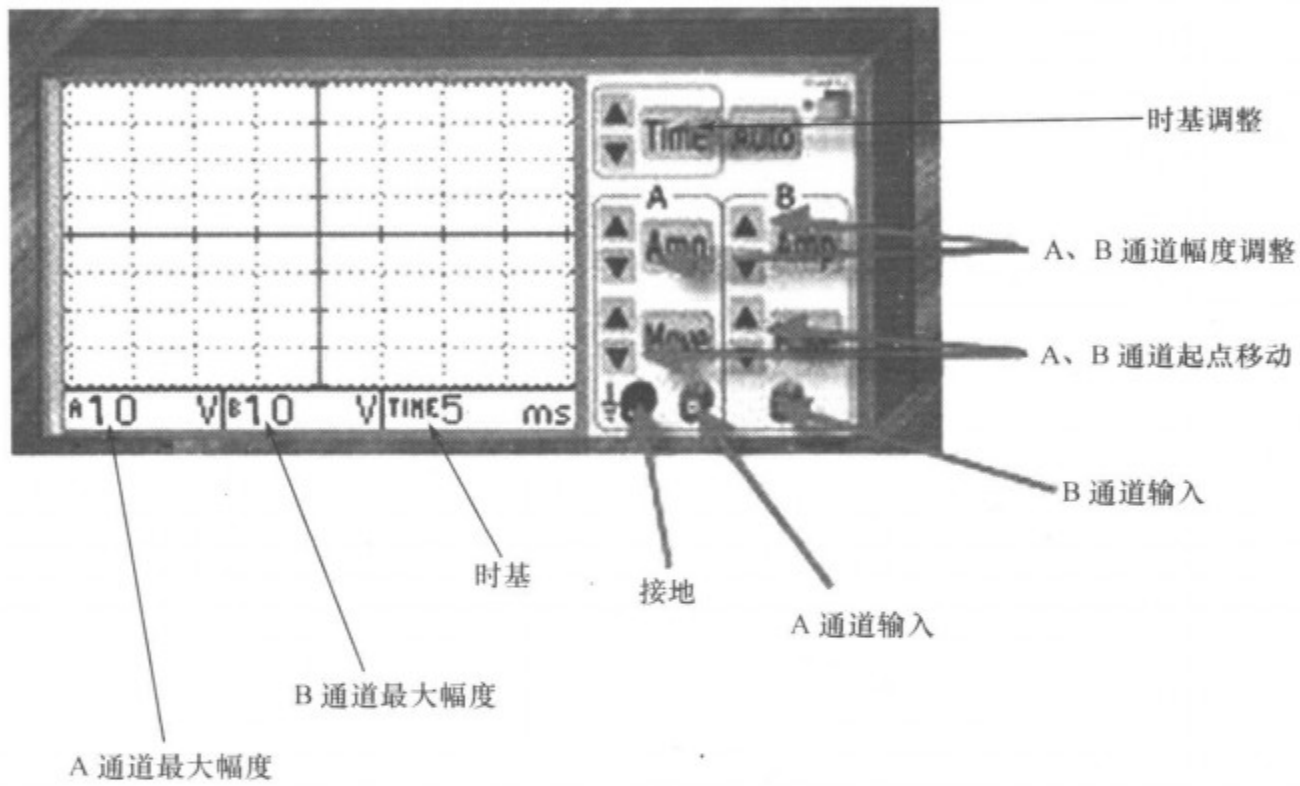


图 10-16　示波器的面板

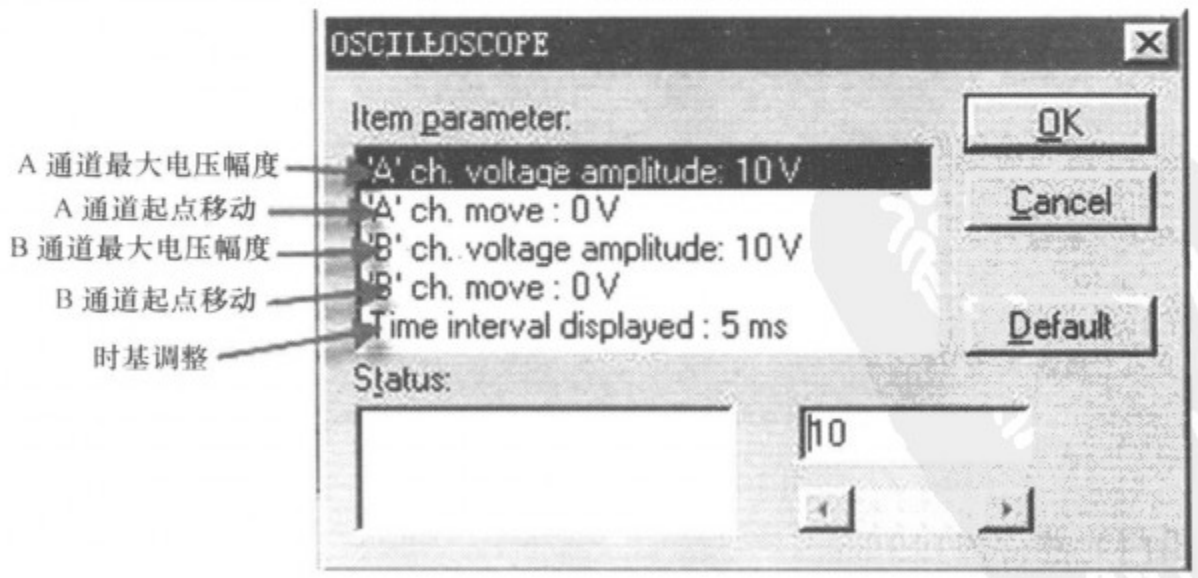


图 10-17　示波器的属性对话框

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

样数量决定的。将信号分析器的“OUT”端连接到被测试电路的输入端;将被测试电路的输出端连接到信号分析器的“IN”端。按“RUN(运行)”按钮开始信号分析器的扫描。信号分析器面板如图 10-18 所示。

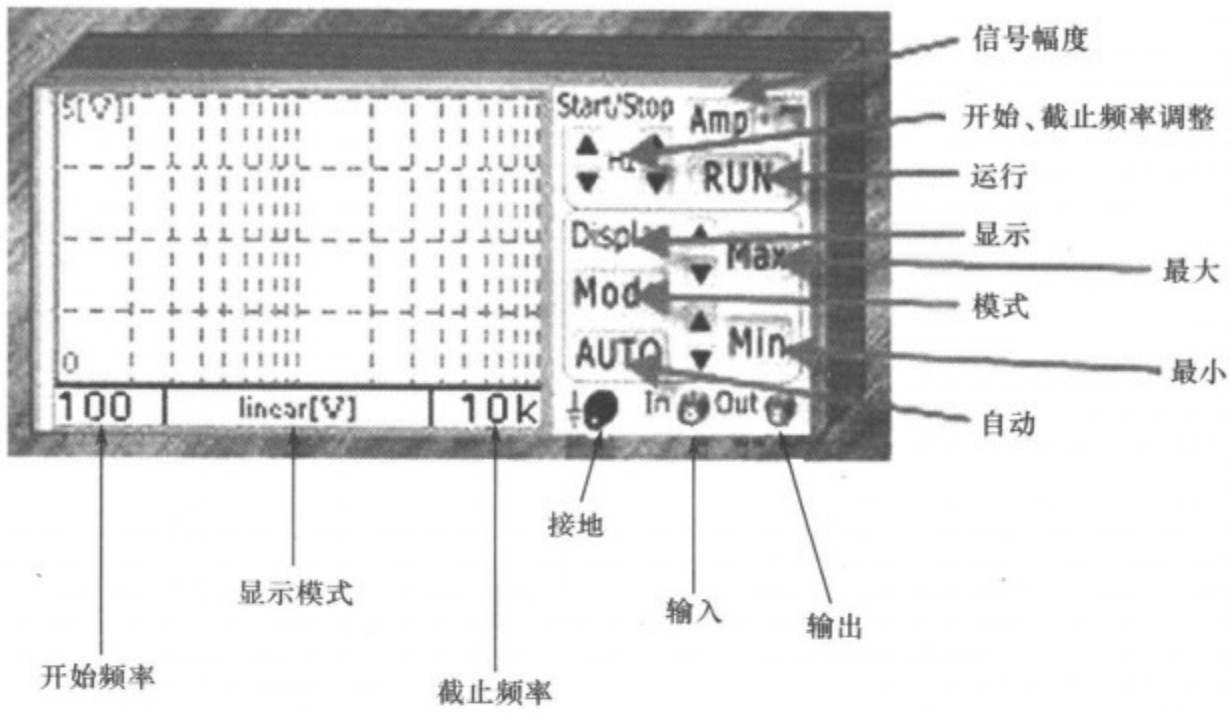


图 10-18　信号分析器的面板

面板中,Start/Stop(开始/截止)用于设置扫描信号的开始频率和截止频率;RUN(运行)用来开始扫描;Mode(模式)用于选择显示模式(线性电压、线性放大倍数、对数 dB);Aap(信号幅度)用于表示每格所代表的电压值。AUTO(自动)按钮可以根据输入信号自动设置显示幅度。Display(显示)用于调整显示的最大、最小信号幅度,可以单击“Max”(最大)和“Min”(最小),填上最大和最小的信号幅度值,也可以点击增减箭头调整。

(4)半导体元器件库

半导体元器件库有二极管、三极管和场效应管等,如图 10-19 所示。

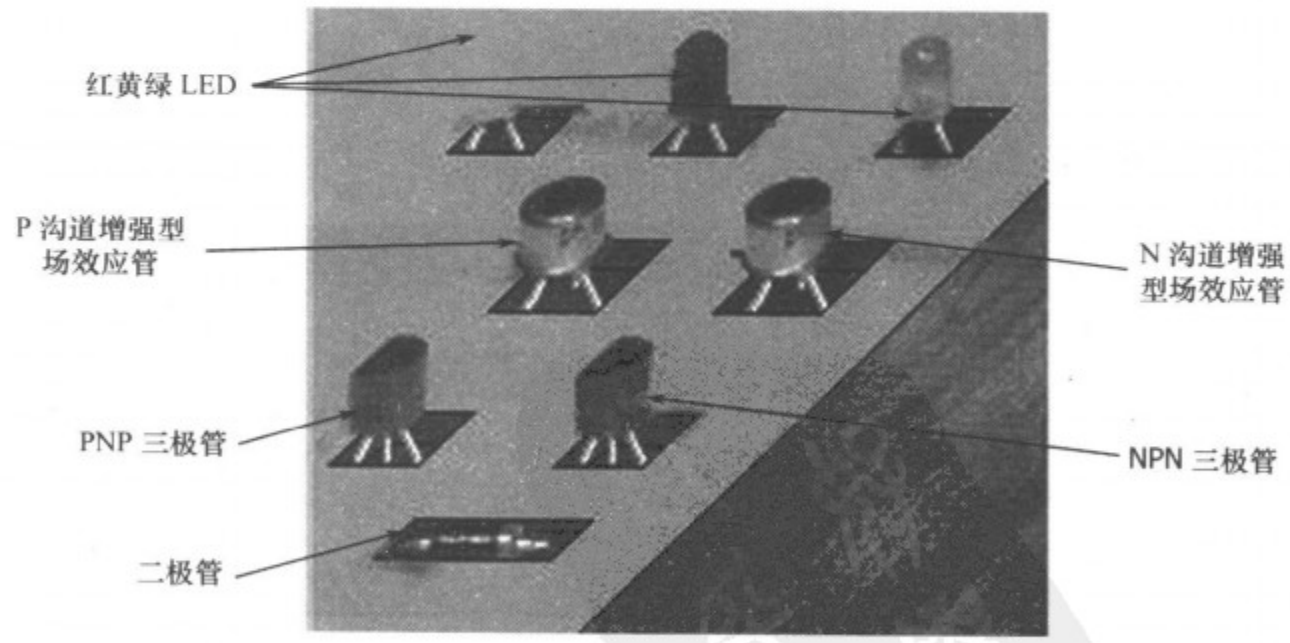


图 10-19　半导体元器件库

(5)逻辑门元器件库

逻辑门元器件库有与门、与非门、或门、或非门、非门、异或门和接地等,如图 10-20 所示。

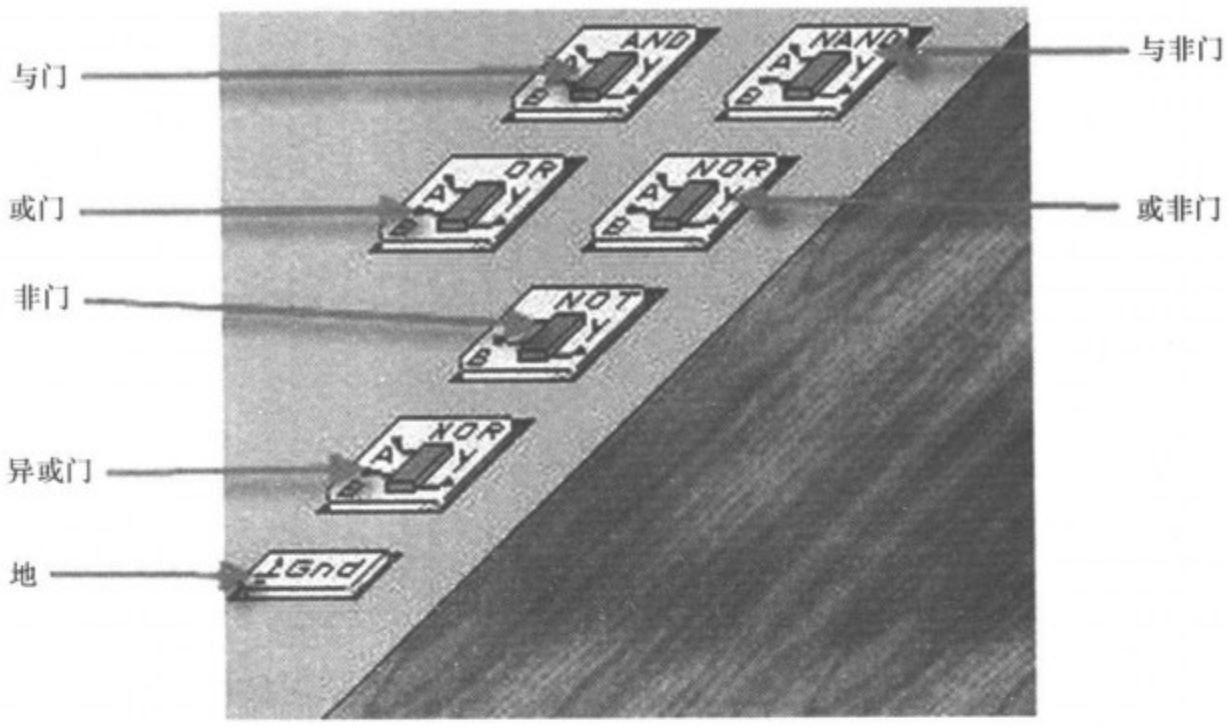


图 10-20　逻辑门元器件库

(6)IC 器件库

IC 器件库有 555 时基电路、741 放大器、JK 触发器、D 触发器和锁存器，如图 10-21 所示。

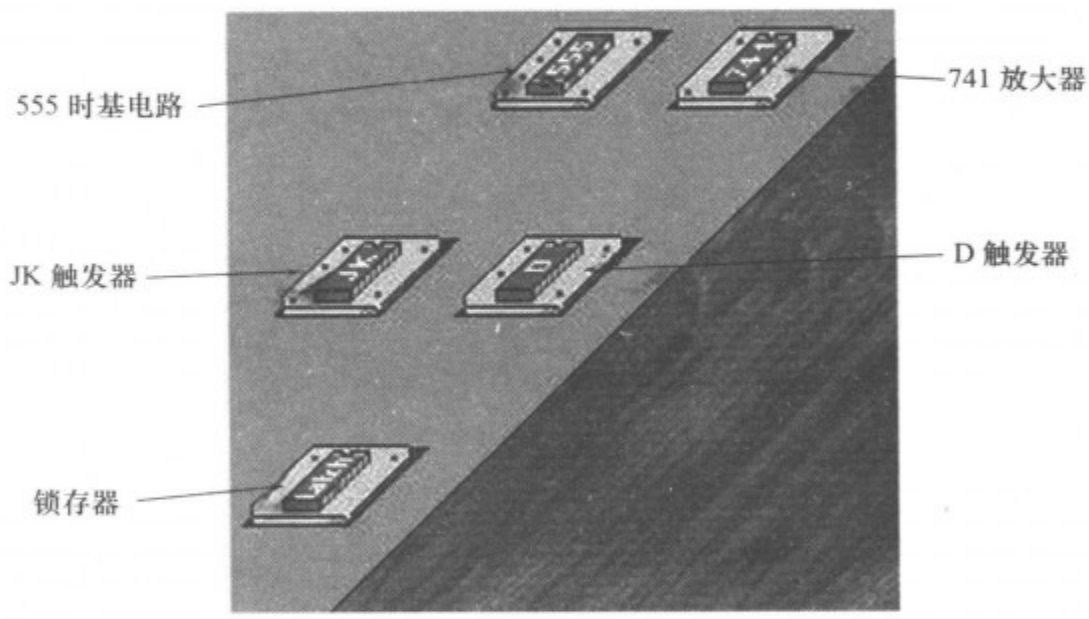


图 10-21　IC 器件库

(7)开关器件库

开关器件库有按压式开关、按钮开关、扳钮开关和连接器，如图 10-22 所示。

连接器也称接线柱，应用连接器可用来连接电线，每个连接头允许连接的数量不限。也就是说，能连接任意多的线到一个连接器，它对电路没有电的影响且没有错误状态。

(8)选择型开关和继电器库

选择型开关和继电器库有选择开关和继电器，如图 10-23 所示。

(9)仪表库

仪表库有数字万用表、电压表、电流表和电阻表，如图 10-24 所示。

数字万用表有五种功能，可分别作为直流伏特表、交流伏特表、欧姆表、直流电流表、交流电流表使用。要选择不同功能，只需单击万用表上数字指示器上的相应按钮。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

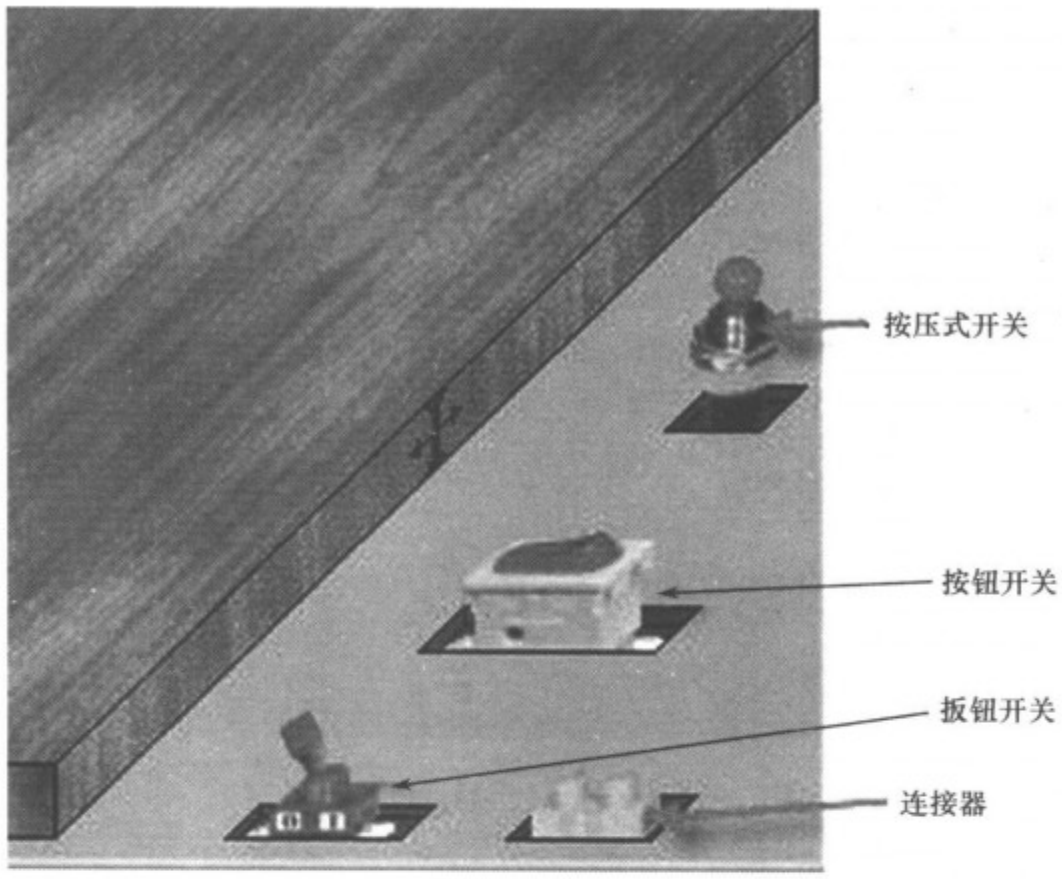


图 10-22　开关器件库

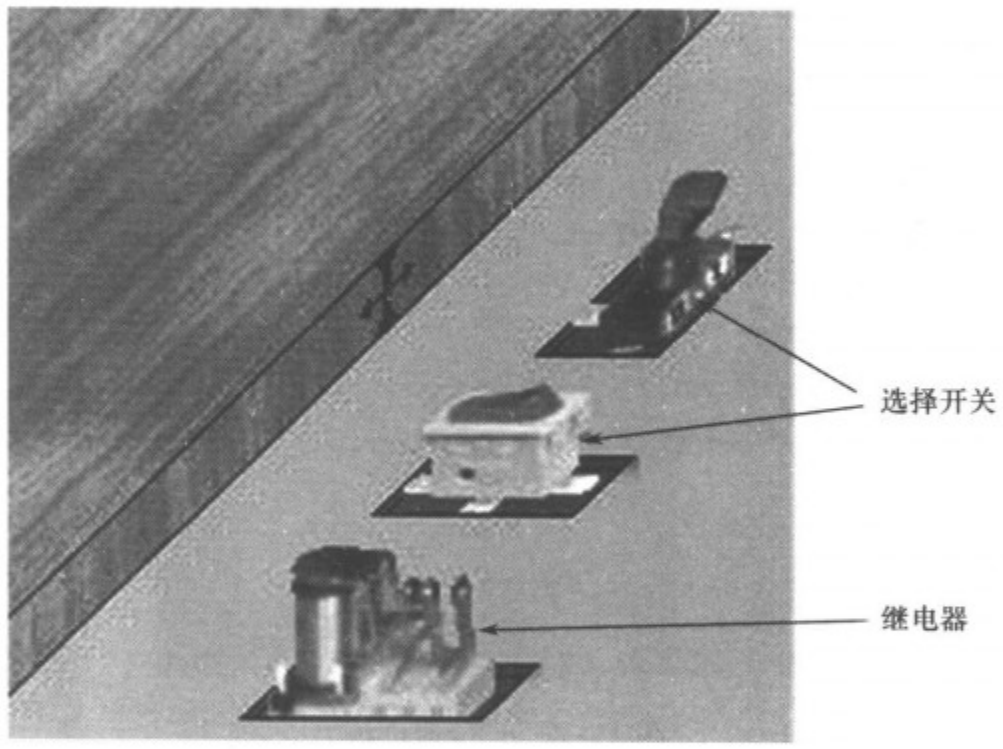


图 10-23　选择型开关和继电器库

(10)写字板

在进行电路组建或实验时，可以通过写字板来添加文字信息，好像平时用的黑板一样。其中有四种大小不等(微型板、小板、大板、超大板)的写字板可供选择。需要注意的是，写字板的调用和前面所述的部件不一样，它必须单击主菜单“Edit”(编辑)下的“Select Shelf”(选择部件架)来启动。启动后，在元件和仪器库上便出现了大小不等的四块写字板，如图 10-25 所示，然后才能像其他部件一样调用。

用户可以在写字板上写下实验内容、步骤、原理、要求、提示等。写字板调用到实验工作台后，双击该写字板，便出现一个文字编辑对话框，在上面可以输入想要书写的内容，如图 10-26 所示。

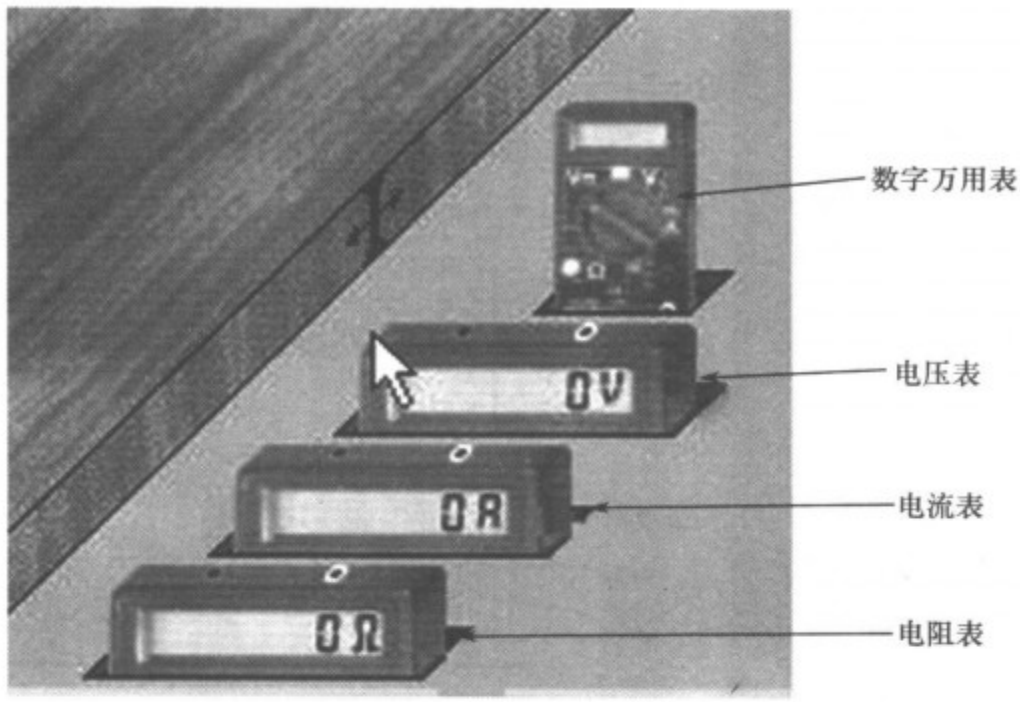


图 10-24　仪表库

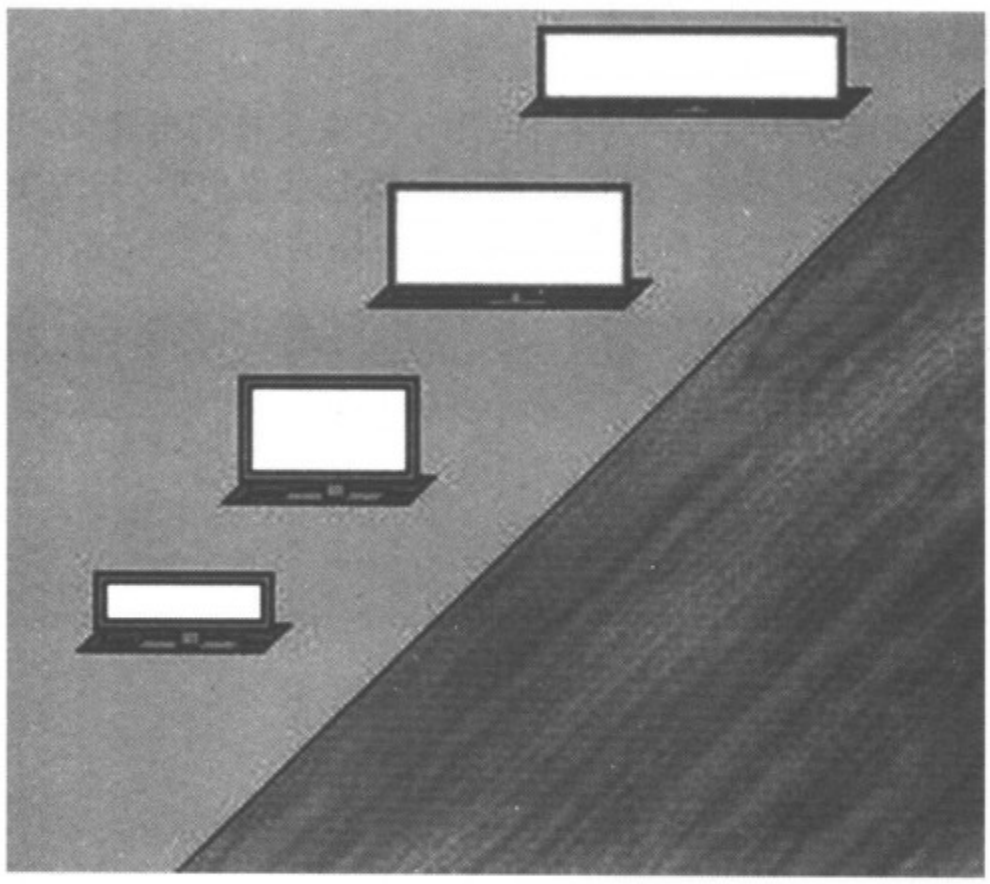


图 10-25　四块写字板

方法技巧：绝大多数部件均有一个错误状态参数，注明为可操作状态或故障状态。如果用户设置了错误状态，它还能模拟一些可能的部件故障。下面以电容器元器件的错误状态设置方法为例进行说明。先将电容器放在实验工作台上，然后选择主菜单上“Edit”（编辑）下的“Modify parameter”（修改参数）功能项，鼠标箭头右下边出现☰图标时，单击欲修改电容器部件，系统弹出如图 10-27 所示的对话框，在该对话框中的“项目参数”栏内多出了“错误状态”一项，点击该项目，在下面的状态栏内即可选择“无故障”、“开路”和“短路”。

3. 实验工作台

在立体声光实验室里，最明显的就是工作台，工作台是做电子实验所必备的东西。Edison4.0 的工作台是可以变化的，也就是说，用户可以通过 Edit（编辑）→Background Picture（背景图片）选择背景图片。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载



图 10-26　文字编辑对话框

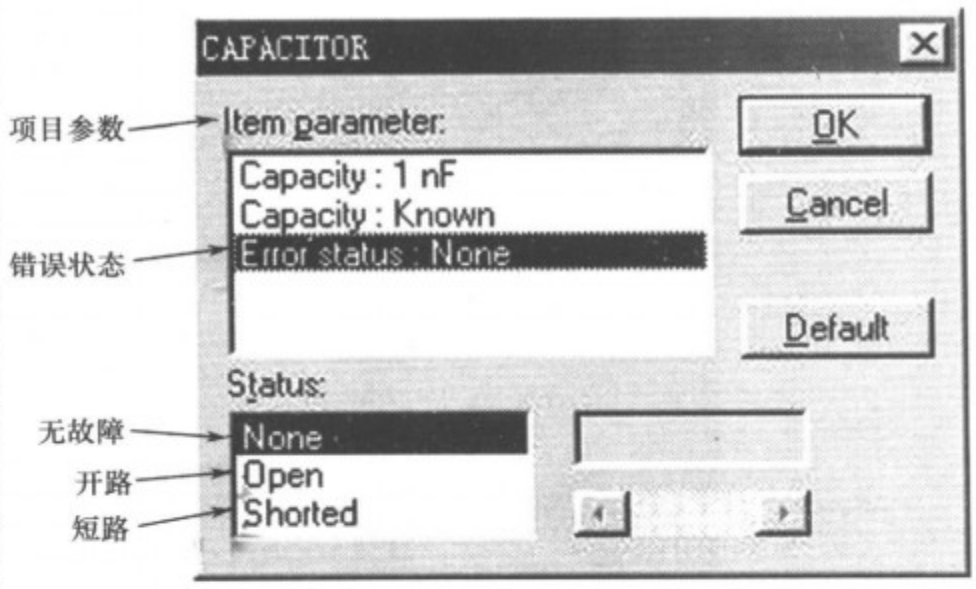


图 10-27　电容器参数属性对话框

三、电路图分析器

Edison4.0 右边的视窗为电路图分析器，用于产生实物的电路图。电路图分析窗口菜单中，有文件、编辑、插入、视图、分析、工具和帮助七个菜单项，如图 10-28 所示。Edison4.0 可通过这个窗口将实验工作台上的实物以电路的形式表示出来。

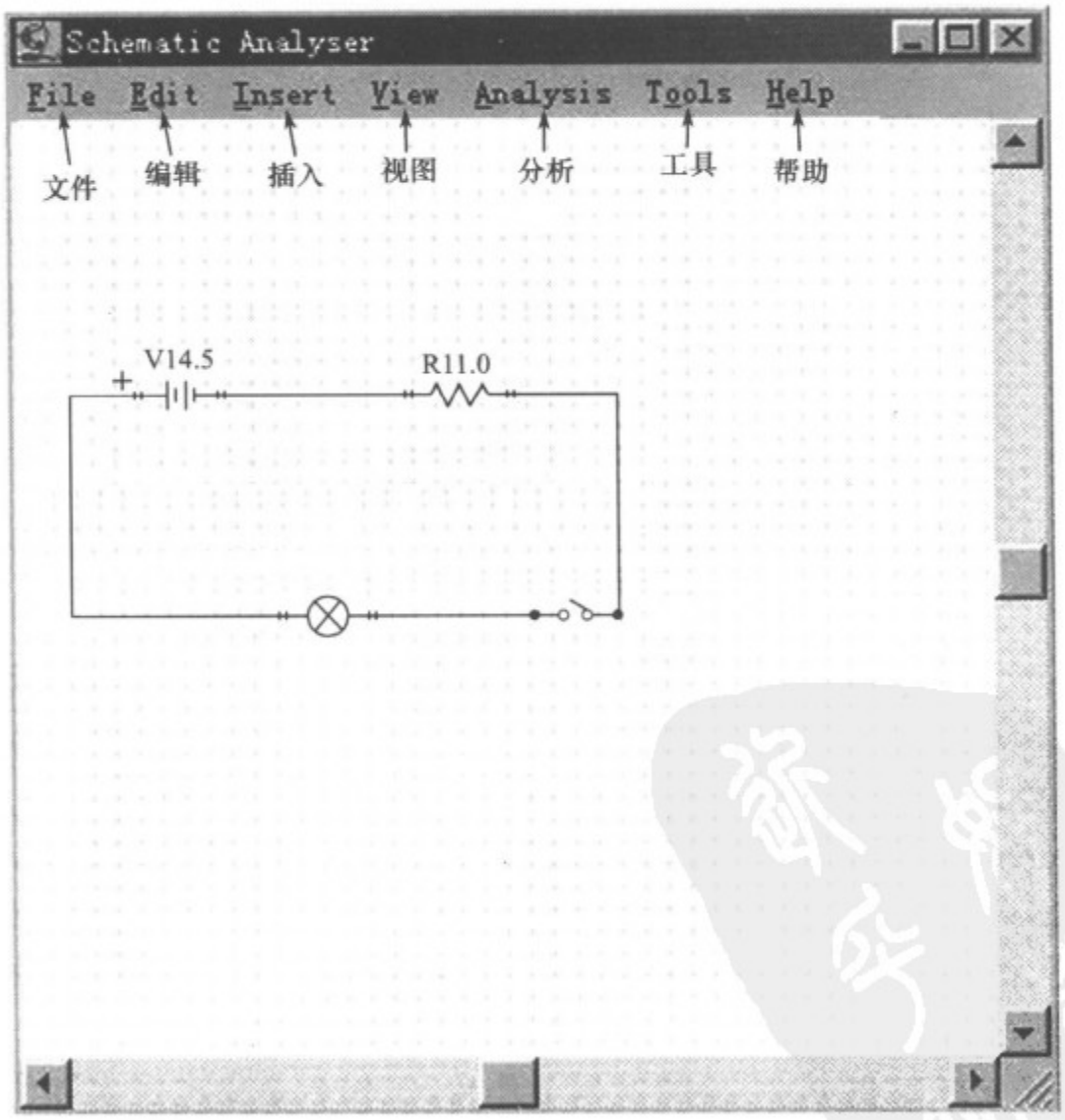


图 10-28　电路图分析窗口

文件菜单功能比较简单，作用是对电路文件进行管理，包括保存、另存为、打印、打印设置等。

编辑菜单可以提供一般的编辑功能，如复制、粘贴等。

插入菜单可以插入文字和图形，以便对电路图做进一步的补充说明。

视图菜单中包括普通视图、页面视图、缩放、网格线、基点标记和重画等，以便对电路图进行编辑。

分析菜单可以设置环境温度等分析参数。

工具菜单提供了两种工具：一种是图表窗口，在数值分析或测量完成以后，图表窗口把计算的结果用图形显示。第二种是方程编辑器，用于显示分析结果，分析结果能够被拷贝到图表窗口中。

帮助菜单可以根据用户的需要查找相关资料。

四、Edison4.0 的控制面板

Edison4.0 的控制面板如图 10-29 所示，虽然控制面板只有四个功能按钮，但在模拟实验中给用户提供了很多的方便，下面介绍这几个按钮的作用。

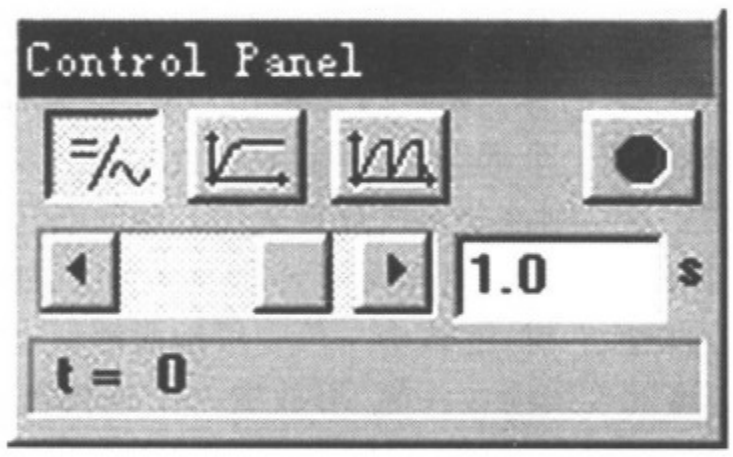


图 10-29　控制面板

按钮的作用是设置直流或交流(DC/AC)模式。这是系统的默认方式，这种方式就是假定所有电流和电压不变或按正弦波曲线改变。它能呈现直流(DC)电流/电压的直流值以及交流(AC)电流/电压的有效值或峰值。

按钮的作用是设置单个瞬时模式。按下开始/停止按钮，系统将进行单个脉冲仿真(从零时间到控制面板所设定的时间)。实际运行时间显示在控制面板的底行，注意控制面板的时间设定也影响仿真的实际执行时间，默认仿真时间是 1s。这种方式的重要应用是获得仿真过程的图表或公式，当仿真结束(开始/停止按钮弹出)，移动光标到伏特表、安培表或示波器上，单击鼠标右键，会显示图表、公式等快捷菜单。

按钮的作用是设置连续瞬时模式。按下开始/停止按钮，系统开始进行连续仿真。再次按下开始/停止按钮，不会立即停止仿真，只有当控制面板所设定时间的下一个整数倍到达时才停止。如果用户需要立即停止仿真，按 DC/AC 按钮即可。

按钮的作用是开始/停止仿真。

下面的滚动条的作用是设定模拟仿真的时间。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

五、Edison4.0 的基本操作

1. 将部件放置到实验工作台

系统的大多数命令可以用鼠标执行，单击鼠标左键表示确认，鼠标右键表示对对象的删除或操作的取消。

选取部件的方法是：将鼠标放置于部件之上，并按鼠标左键（或回车键），移动鼠标，则选定的部件会随着鼠标光标到实验工作台上，同时在右边的电路图绘制区内，也有一个和部件相应的元件符号随之移动，在合适的地方再次单击鼠标左键放置所选定的部件，在选取和放置部件时还会听到计算机音箱中发出“啪“、“嗒”的声音。

在移动部件时，不必一直按住鼠标左键不放，当部件被移动时，还能通过按 Ctrl 键进行旋转，但并不是所有部件都能旋转。

如果选错了部件，可以按鼠标右键取消；如果部件已放置到了实验工作台上想移去，只需用鼠标左键按住该部件拖回到元件和仪器库上，再点击右键即可。

2. 添加和删除连线

当部件已在实验工作台上放置妥当后，还需要将它们用导线连接。连接导线的方法是：移动鼠标光标至其中一个部件的连接终端，直到光标变为一个中间有个小钉子的小圆圈，按一下鼠标左健，移动鼠标，则有一条连线被拖出，用户能画任意曲线，系统将自动创建平滑路径，继续移动光标到另一个部件的终端，鼠标光标又变为小圆圈，并点击鼠标左键，电脑音箱内发出“嗒”的一声，则该条连线连接成功。同时右边的电路图绘制区内也会出现相应的连接导线，并且是用整洁的直角线代替徒手画的线，如果在该条连线还未连接完成时需要更改，只需点击鼠标右键，连线会一段一段地撤消。

如果需要将三条或更多的连线连在一起，可放置一个连接器，并用它连接其余的线。在连接连线时还需注意一点，因连接部件的连线的走向同时还决定了右侧电路图绘制区内电路的导线走向，所以要保证连接好部件的同时又要使电路图规范，就必须在对部件连线时注意连线的走向和距离。

删除连线的方法是：将光标移至需删除连线的任意位置处，此时鼠标光标变为手形，单击鼠标左键，该条连线变为绿色，再选择菜单“Edit”（编辑）下的“Delete”（删除）或按键盘上的“Delete”键即可。如果想撤消已选定的连线，按鼠标右键或 Esc 键，亦可将鼠标在其他空白区域单击一下左键或右键。

3. 移动和删除实验工作台上的部件

要移动部件到另一个位置，放置光标到该部件之上，并按住鼠标左键不放，这样就能拖拽部件并将其放在新位置。注意当部件被拖拽时，所有连接它的连线都将被删除，为防止出现这种情况，只需将主菜单“Option”（选项）下的“Keep wires at move”（移动时持住线）选定，也就是在这个功能项前面打“√”。

另一种移动部件的方法是：将光标移至需移动的部件上，此时光标右侧会出现“?”（有些部件没有），再单击鼠标右键，在出现的快捷菜单中选择“Move”（移动），将光标点一下“Move”，便能移动部件，放置部件到新位置，点击鼠标左键确认即可。

删除部件的方法是：将鼠标点击部件，此时部件周围出现一圈绿线，再选择菜单“Ed-

it"(编辑)下的"Delete"(删除)或按键盘上的"Delete"键。也可在需要删除的部件上点击鼠标右键,在出现的快捷菜单上选择"Delete"(删除)。

4. 修复

当电路中的部件损坏后,可以使用修复命令来修复故障部件。方法是:首先选择主菜单上的"Repair"(修复)功能,此时光标将变成螺丝刀的形状,将其指向故障部件,点击鼠标左键,便可立即修复。

需要注意的是,修复部件前,须弄清该部件是什么原因导致其损坏,并有针对性地予以调节,否则,刚修复好的部件又会马上损坏(如电灯再次爆炸等)。在普通编辑和实验方式下,系统将消除错误并复原它的正常状态。

方法技巧:为了检验使用者对基本电路的掌握情况,Edison4.0 设置了"问题"一栏,使用方法是:在主菜单上单击"Problems"(问题),在随后出现的对话框中单击"Problems"文件夹,如图 10-30 所示。

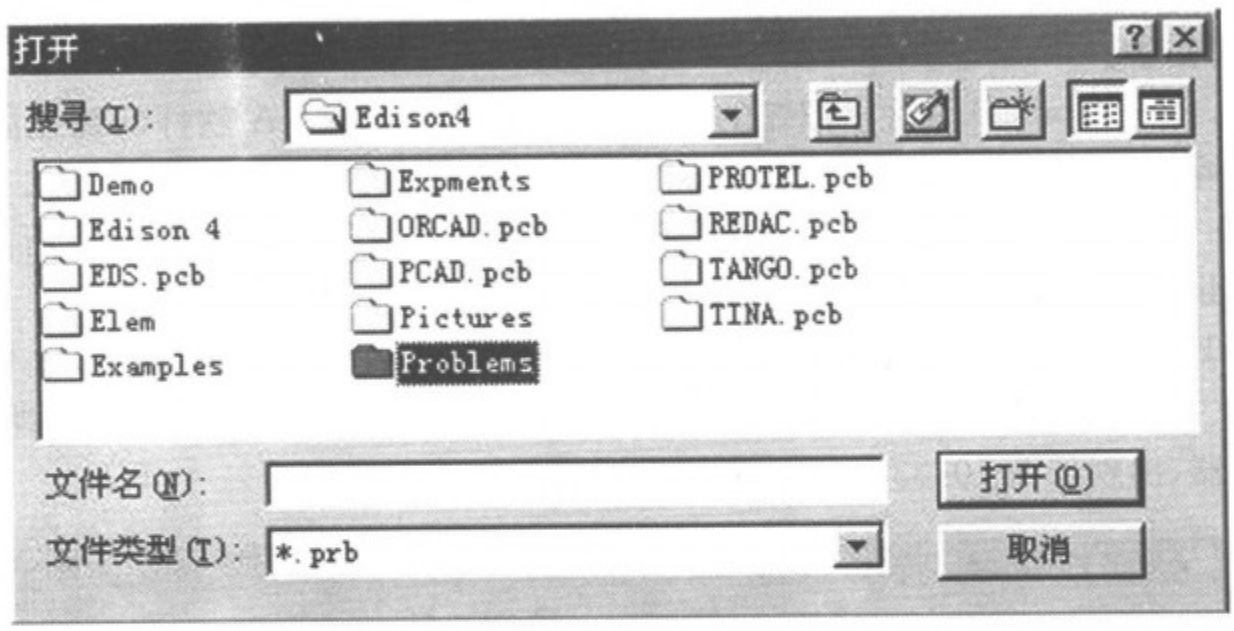


图 10-30　打开 Problems 文件夹

点击 Problems 文件夹的 demo.prb 文件,单击"打开"按钮,再次单击主菜单上的"Problems"选项,即可出现如图 10-31 所示的问题对话框,同时伴有进军的号角声。

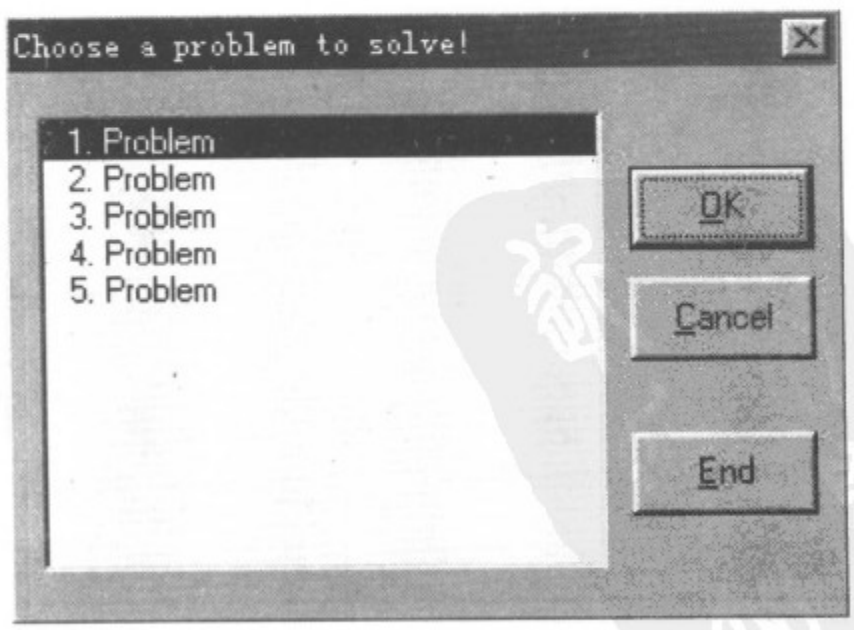


图 10-31　问题对话框

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

在对话框中共列出了五个问题，用户可依次单击并确定，Edison4.0 会调出这五个问题让用户回答，其中有选择题、排除故障题、计算填空题。在出示问题的同时，实验工作台上会出现实物连接图，电路图绘制区内也会出现电路图，在用户解答这些问题过程中，如果答对了，得了高分，它会掌声鼓励，要是答错了，它也会毫不客气。

六、电路图编辑器

为了设计和仿真复杂电路，匈牙利 Designsoft Inc. 公司设计推出了电路仿真软件 TINA，TINA 可简便快捷地绘制电路，可用 20 种电路分析模式和 7 种虚拟电学实验设备来分析电路。TINA 仿真电路的结果可展现在图表中或以虚拟仪器的方式显示，或在交互式模式下显示仿真结果。通过仿真分析，可获得电路的符号表达式、波特图、牛克斯图、极点和零点、瞬时响应和数字波形等各种图表。在 TINA 的图表窗口中，可用绘图工具来添加文字，改变字体、数轴、线宽、颜色等图线属性。还可将电路图粘贴到图表中，或将图表粘贴到电路图中。当然也可以将电路图和图表粘贴到 Word、PowerPoint 等文档中。

其实，在 Edison4.0 软件中捆绑的电路图编辑器就是 TINA 软件的简化版，在 Edison4.0 的电路图编辑器里所提供的元器件库，与 TINA 软件提供的相差无几，它们分别放置在 10 个元器件示意图库里，只要切换到所要取用的元器件库即可选取所需元器件。下面对 Edison4.0 电路图编辑器的元器件库和主要功能进行简要介绍。

启动 Edison4.0 电路图编辑器的方法是：从开始菜单中找到 Edison4.0 文件夹，找到 Schematic Analyser 文件，如图 10-32 所示。双击 Schematic Analyser 文件，即可启动电路图编辑器，出现如图 10-33 所示的工作界面。

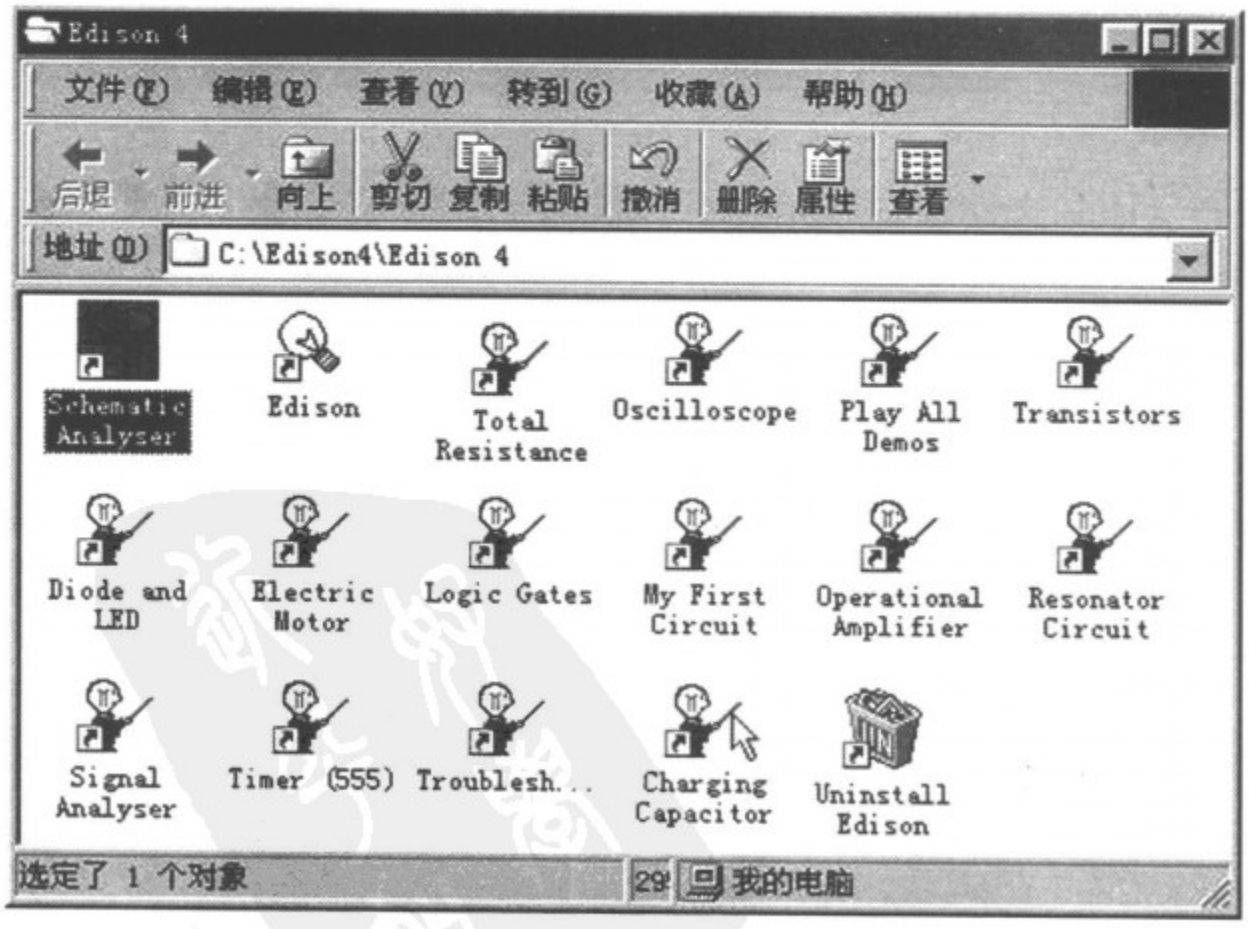


图 10-32　找到 Schematic Analyser 文件

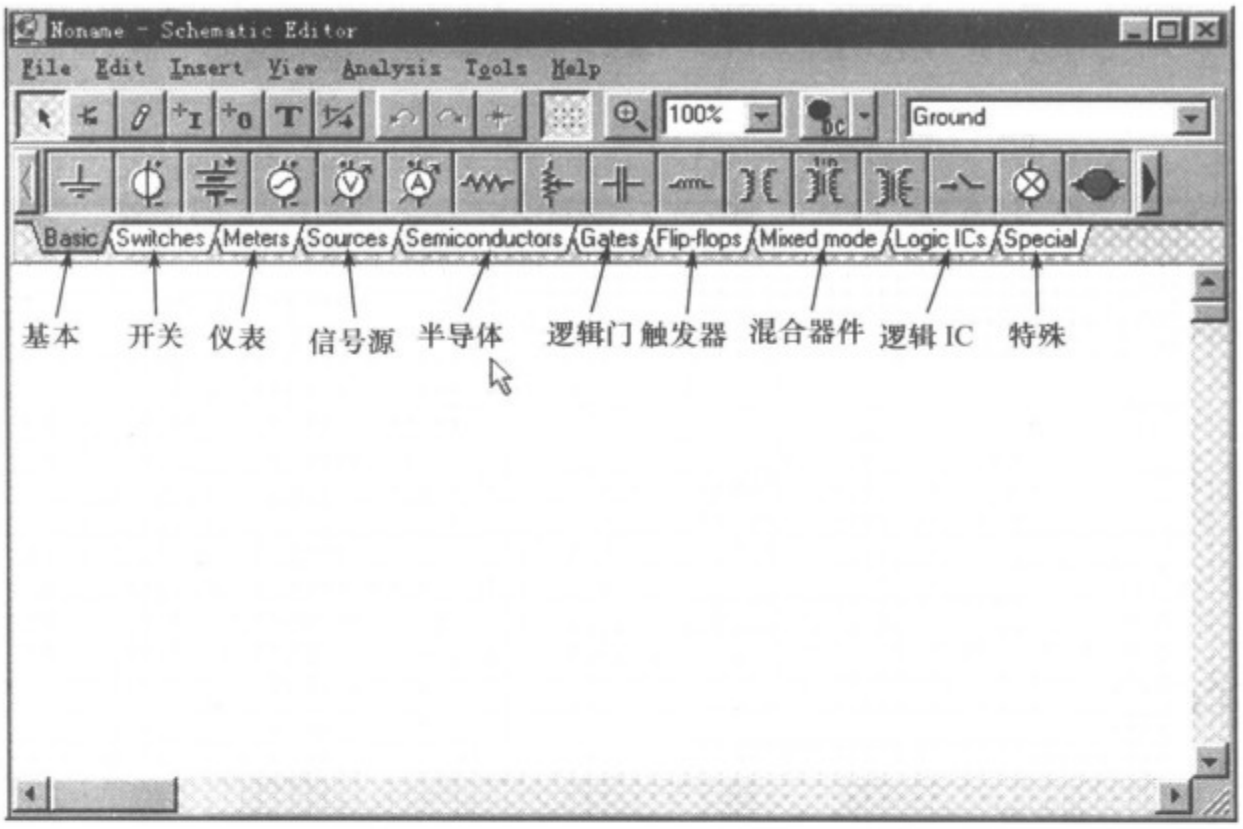


图 10-33　电路图编辑窗口

在图中，用户可以看到各类元件被分为基本、开关、仪表、信号源、半导体、门、触发器、混合器件(AD/DA-555)、逻辑、特殊等几大类。利用电路图编辑器，用户不仅可以进行电路原理图的绘制与编辑，还可以对其进行实时仿真分析。

1. 元器件库

在电路图编辑器元件库中，包含有最常见的元器件。电源、信号源和仪表也被看成是元件。电路图编辑器将元件分成“基本”、“开关”、“仪表”等 10 类，每种元件均以图标显示，调用十分方便。

(1)基本器件

基本器件如图 10-34 所示。

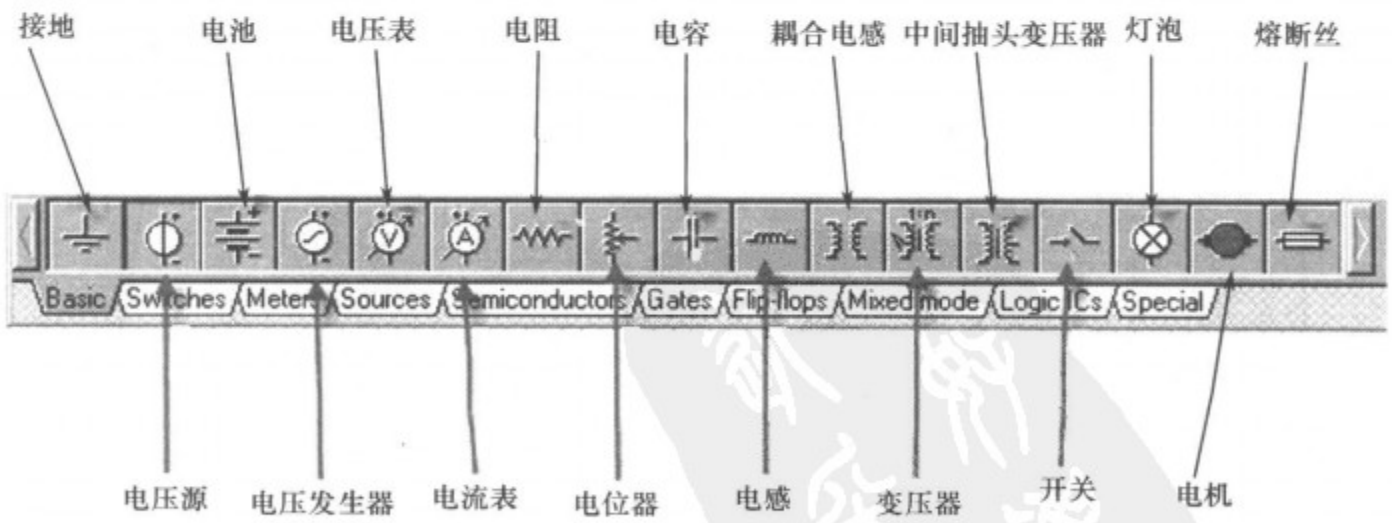


图 10-34　基本器件

(2)开关器件

开关器件如图 10-35 所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

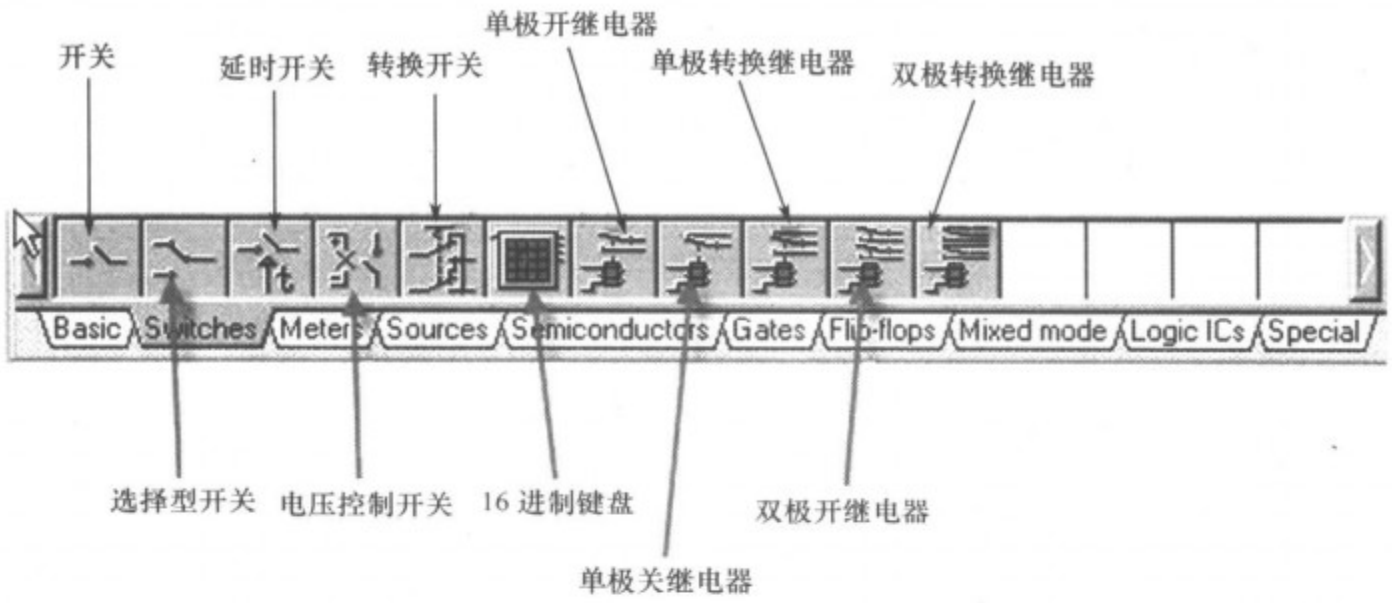


图 10-35　开关器件

(3)仪表

常用仪表如图 10-36 所示。

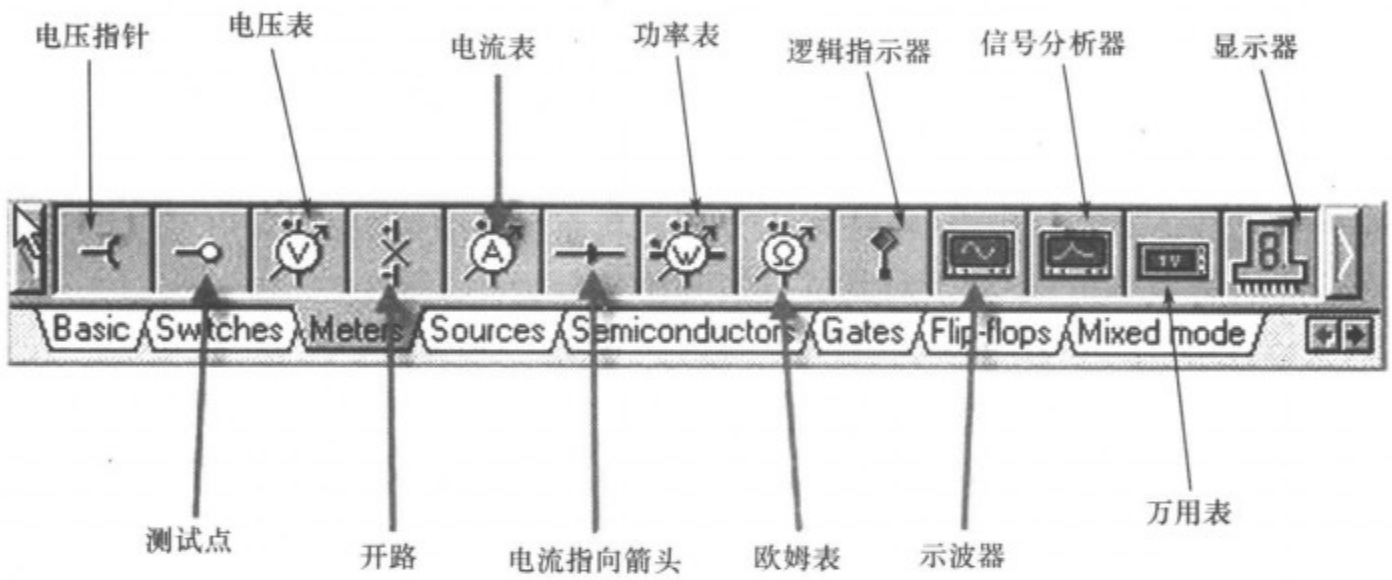


图 10-36　常用仪表

(4)信号源

信号源如图 10-37 所示。

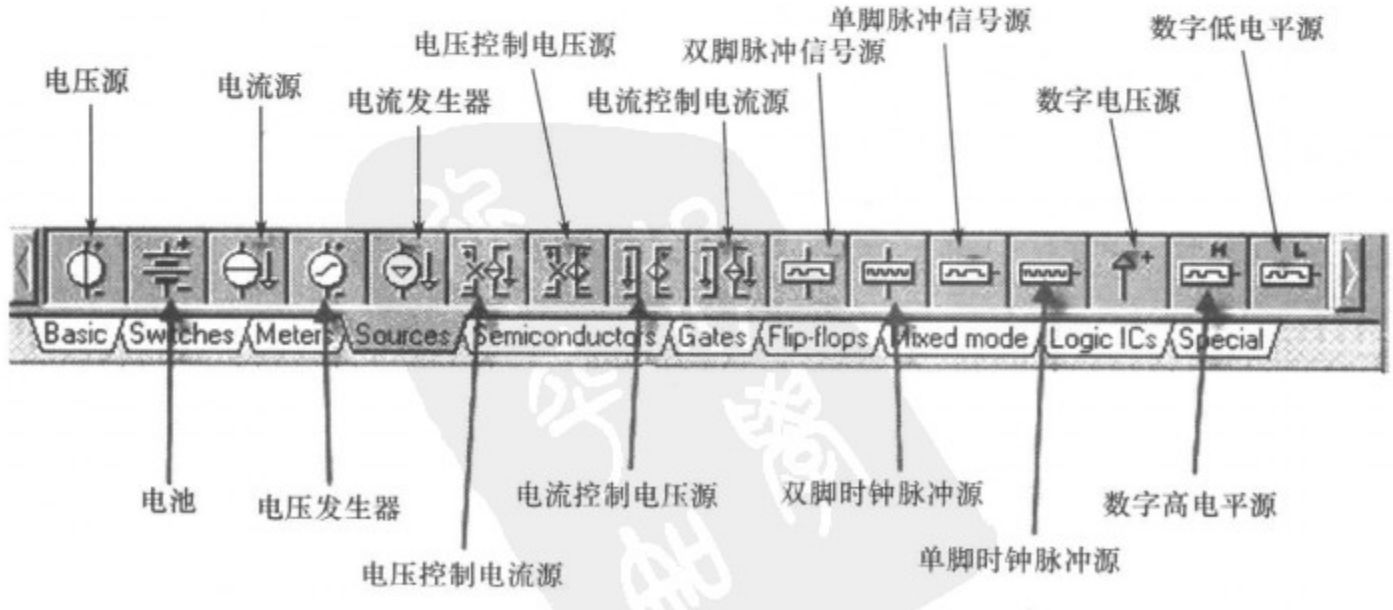


图 10-37　信号源

(5)半导体器件

半导体器件如图 10-38 所示。

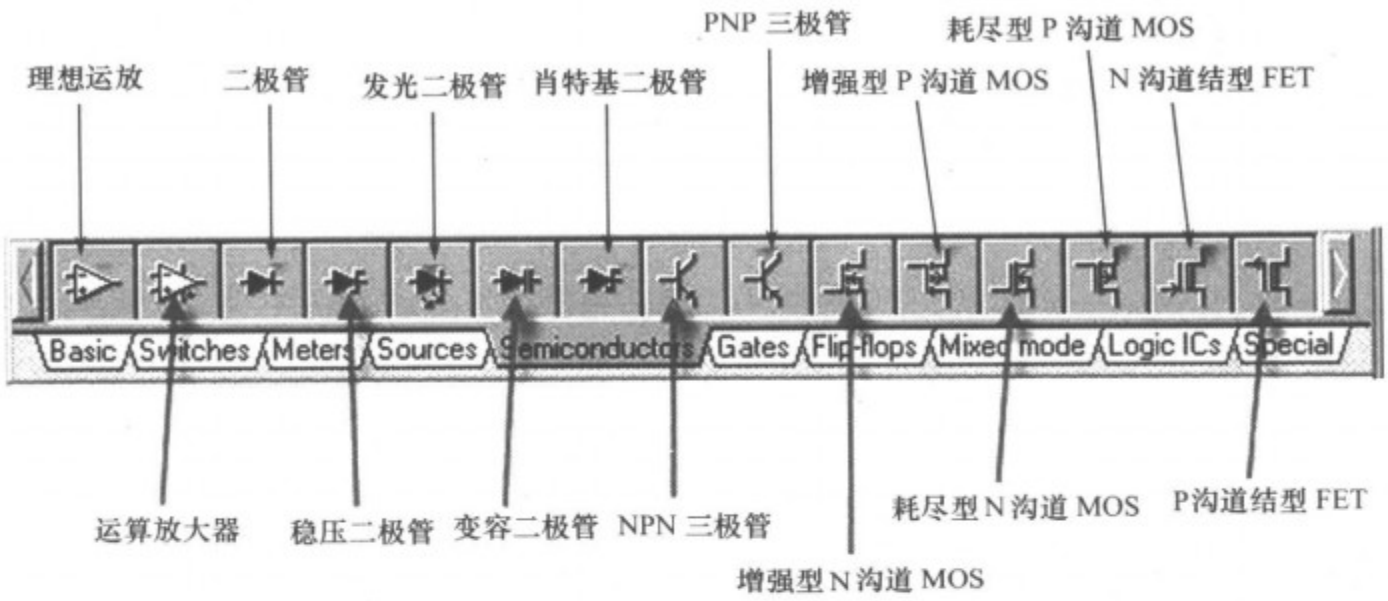


图 10-38　半导体器件

(6)逻辑门

逻辑门如图 10-39 所示。

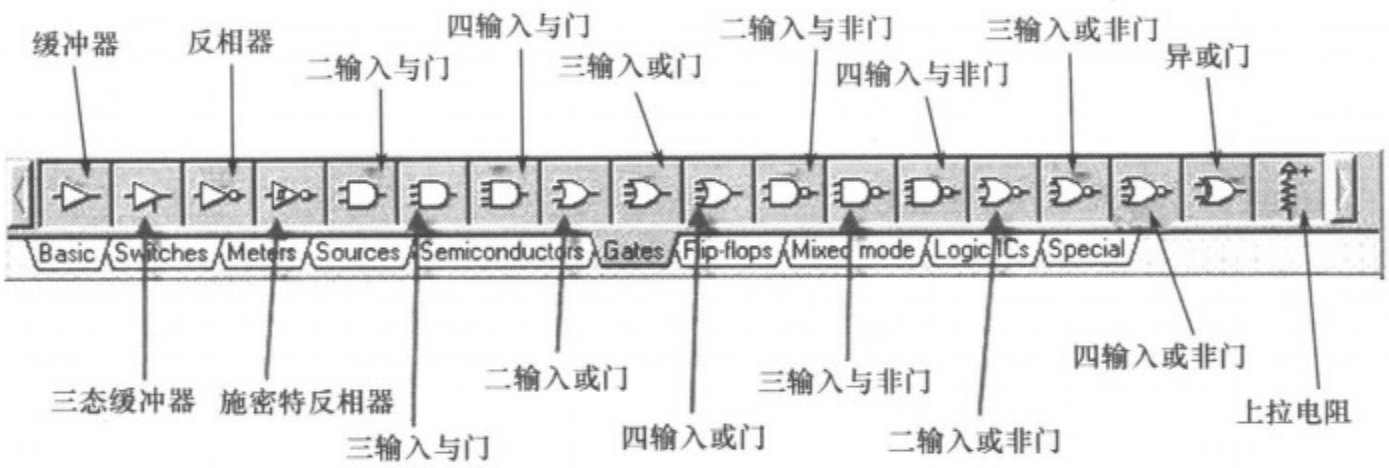


图 10-39　逻辑门

(7)触发器

触发器如图 10-40 所示。



图 10-40　触发器

(8)混合器件

混合器件如图 10-41 所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

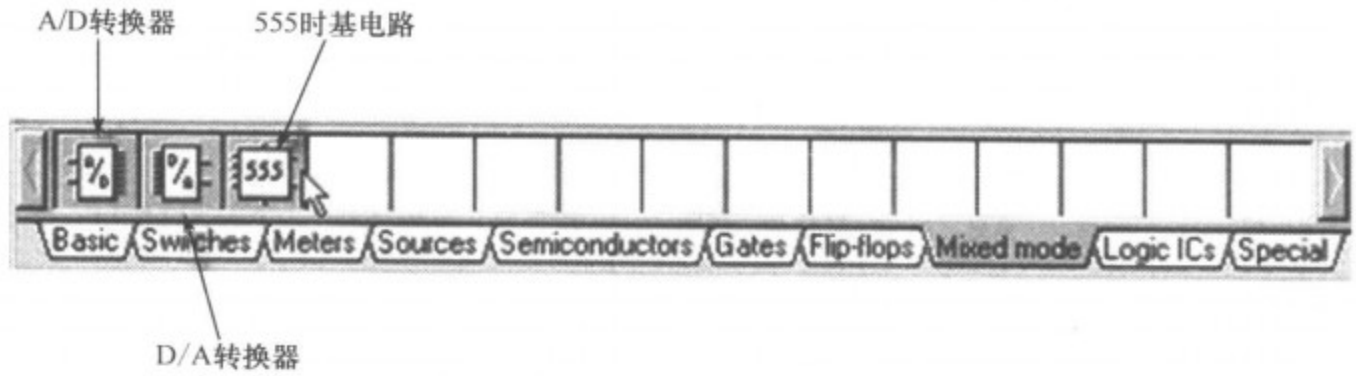


图 10-41　混合器件

(9)逻辑 IC

逻辑 IC 只列出了几个典型集成电路,如图 10-42 所示。

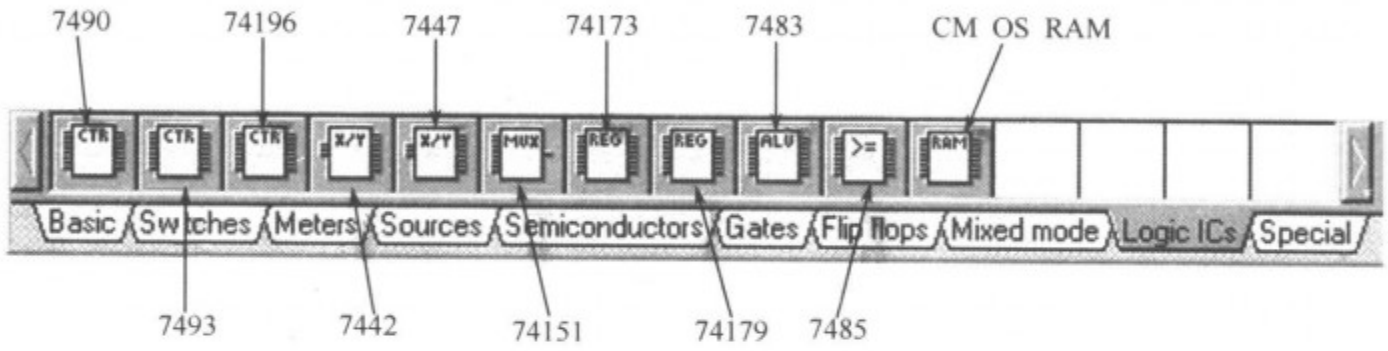


图 10-42　逻辑 IC

(10)特殊器件

特殊器件如图 10-43 所示。

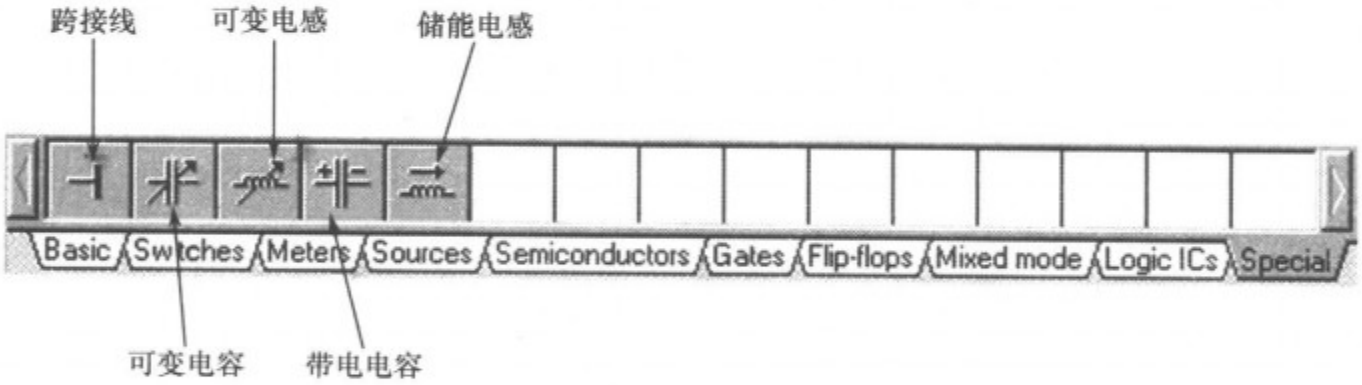


图 10-43　特殊器件

2. 交互式模式

点击工作栏 DC 按钮右边的箭头,即可弹出如图 10-44 所示的下拉菜单。

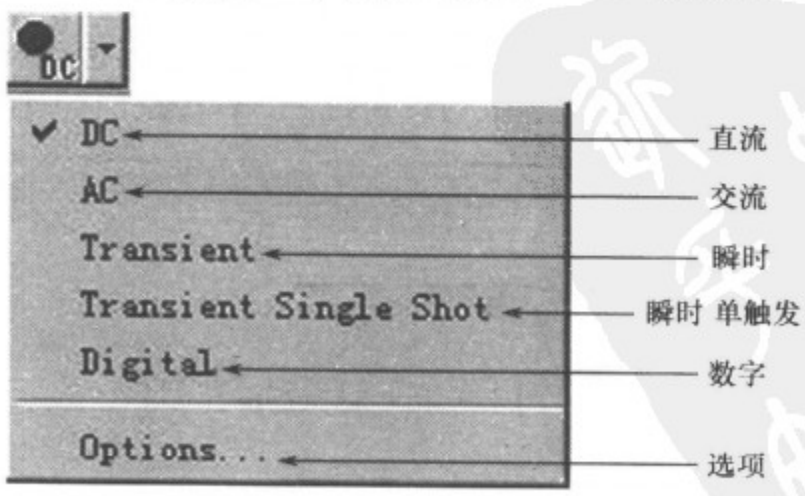


图 10-44　交互式下拉菜单

DC 用于直流分析；AC 用于交流分析；Transient 用于瞬时分析；Transient Single Shot 用于瞬时单触发分析；Digital 用于数字分析；Options 为设置交互式模拟的选项，点击后，出现如图 10-45 所示的对话框，可对仿真时间单位和动画时间单位进行设置。

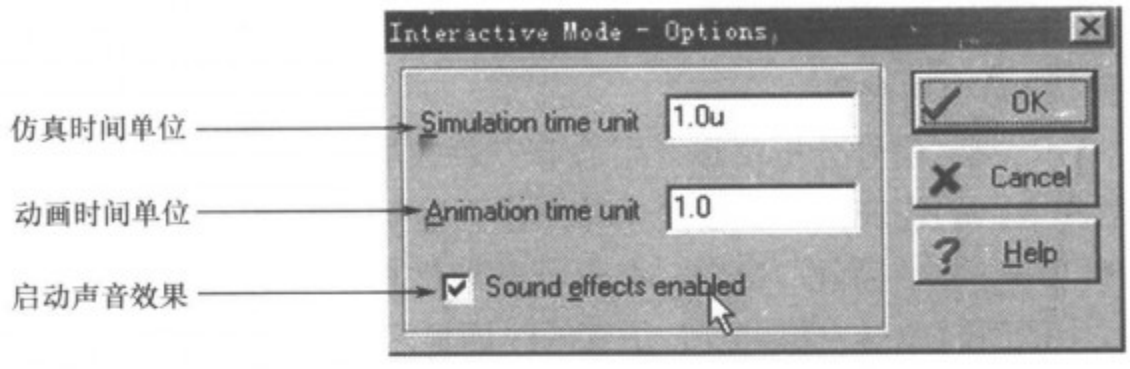


图 10-45　选项对话框

3. 基本操作

(1)元件的放置

用鼠标点击需要放置的元件，此时，元件会跟随小手状态的鼠标一起运动，将元件移到需要放置的位置后再单击鼠标即可。

(2)元件的旋转

选中元件后，点击工具栏上的↶按钮可向左旋转 90°，点击工具栏上的↷按钮可向右旋转 90°，点击工具栏上的✦按钮可进行镜向旋转。也可通过“Edit”(编辑)菜单或快捷菜单，找到“Rotate Left”(向左旋转)、“Rotate Right”(向右旋转)、“Mirror”(镜向旋转)选项进行操作。

(3)元件的连接

将鼠标指向需要连接的元件的一端，此时，鼠标变为笔状，然后拖动鼠标左键至需要连接的另一个元件的一端，连接好后松开鼠标即可。

(4)元件的设置

右击元件打开快捷菜单，选中“Properties”(属性)命令，即打开该元件的属性对话框，在此框中设置元件的各参数。

①元件参数的设置。

元件分无源元件和半导体器件两大类。无源元件包括电阻、电容、电感、电位器及开关、灯泡、电动机等。在“特殊器件”栏中有带电电容、储能电感等特殊元件。电阻、电容和电感等元件有较多的参数选项。除了元件量值外，还有环境温度和温度系数等参数。电容器可设置并联漏电阻，而电感器可设置串联损耗电阻。所有的元件都可以设置它们的“错误状态”，供学习电路原理使用。

在 Edison4.0 的电路图编辑器中，有较多的半导体器件。在器件属性对话框中点击…按钮，可在打开的目录编辑器中更改器件的型号，甚至修改器件的模型参数。

②信号源参数的设置。

“信号源”栏中有 16 种应用于模拟和数字电路的电源和信号源。“电压源”需要设置的参数是电压、IO 状态和内部阻抗。在某些分析中必须将电源的 IO 状态设为“输入”。“电压发生器”必须设置它的信号类型，如脉冲、单步、正弦曲线、余弦曲线、方波、三角波、梯形波和用户自定义等。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

③仪表参数的设置。

在仪表栏中有各种电气仪表或显示器件 13 种。使用最方便的是电压指针和电流指向箭头。电压指针在电路中指示节点电位，电流箭头指示支路电流。电压表、功率表、欧姆表和阻抗表测出电路中相应的电学参量。如果是交流电路，这些仪表还能指示相关的交流参数，如相位、无功功率等。

在此栏中有示波器、信号分析仪和万用表等三种仪器图标。仪器图标适合放在电路图中，以表示仪器和电路的连线关系。要使仪器图标正确显示图线，先要设置仪器参数。右击仪器图标，选择“Properties”(属性)命令。在打开的属性框中设置仪器的显示相关参数。按下“交互式模式中的瞬时单触发■■按钮，仿真图线即显示在仪器图标上。要详细研究图线，请选中仪器图标快捷菜单的“Diagram”(图表)命令。在打开的图表窗口中可对图线做各种设置和分析。如果想测出某电压指针处的波形，应将此电压指针的 IO 状态设为“输出”。

(5)输入端和输出端

输入端和输出端在很多分析中是必需的。要插入一个输入端或输出端，应将光标移动到工具栏的输入■或输出■图标上，单击并释放。然后拖动输入端或输出端到电路一个节点上，单击并按住鼠标左键向另一个节点拖动。当输入或输出端已经延伸到第二节点时，释放鼠标。

输入端：对于瞬态分析或 AC 传输特性分析，此命令定义了输入激励将施加到哪两个节点上。一般是将电源的 IO 状态设为“输入”。一个电路在任何时候只能有一个输入端。如果要计算 DC 传输特性，输入函数必须定义为一个信号发生器或一个电阻。信号发生器可以是电压或电流发生器。定义一个电阻器作为输入时，程序对电阻值扫描，程序将按照传输特性设置对话框中的阻值范围步进地改变电阻值。

输出端：作用是定义电路的输出节点。输出端与输入端的颜色不同，输出端的两个端点必须是不同的网络节点。双击输出端，可在打开的对话框中设置输出端标签。用户可以选择电压、电流、功率等作为输出量，此时应定义仪表的 IO 状态为“输出”。某些分析类型(DC 传输特性、波特图、瞬时分析)必须有至少一个输出端。

第二节　用Edison 仿真软件做电路基础实验

前面对 Edison4.0 的各类元件和仪器的放置、连线、修复等操作进行了说明，下面通过几个具体的实例，简要分析 Edison4.0 在电路基础中的应用。通过这些例子可以看到，Edison4.0 在电路基础实验中具有广阔的前景，其栩栩如生的 3D 组件，虚拟的测量技术，丰富的元器件模型库及方程编辑器、电路分析器，可以使用户很好地了解各种电路的性质。

一、闭合电路欧姆定律实验

闭合电路的欧姆定律用公式可表示为：

$$I=\frac{E}{R+r}$$

上式表示，闭合电路中的电流与电源的电动势 E 成正比，与内、外电路中的电阻之和

(r 为电源内阻，R 为外电路的电阻）成反比。

下面进行验证。实验做法：在元器件模型库里取出可调电源，一个电阻，一个安培表放在工作台上，把它们串联起来，如图 10-46 所示。

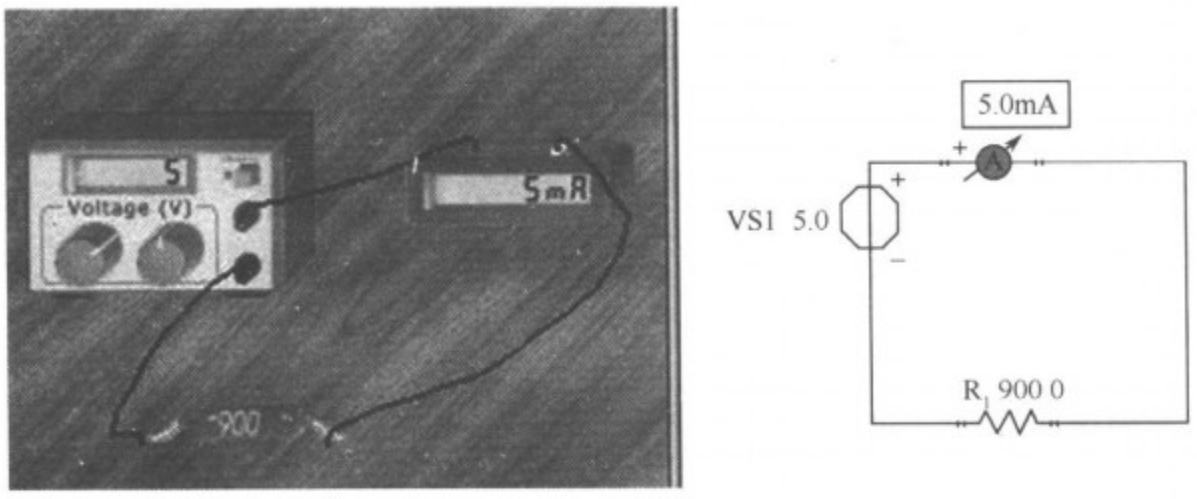


图 10-46　闭合电路欧姆定律实验电路

双击可调电源，打开其属性对话框，将可调电源内阻 r 调整为 100Ω，当电源电压为 5V，外电阻 R_1 为 900Ω 时，回路的电流就是安培表所显示的 5mA。用闭合电路欧姆公式来验证：

$$I=\frac{E}{R+r}=\frac{5}{900+100}=0.005(\mathrm{A})=(\mathrm{nA})$$

实验结果与理论值一致。现在保持电阻值 900Ω 不变，改变电源电压分别为 6V、7V、8V、9V，测出实验的电流值分别为 6mA、7mA、8mA、9mA，再用闭合电路欧姆定律进行计算，结果完全一致。

二、电灯泡实验

电流流过电阻所做的功与完成这些功的时间的比值叫做功率，用 P 表示，公式为：$P=UI$ 或 $P=U^2/R$ 。灯泡在我们日常生活中经常用到，它的原理就是把电能转化为光能。设灯泡的电阻为 R，外加电压为 U，则灯泡的电功率 P 为：$P=U^2/R$。灯泡的每一个参数都有其上限值，超过其上限值，灯泡就会烧毁。本次实验使用的灯泡的额定功率为 15W，额定电压为 110V，可通过打开其属性对话框进行设置。实验电路图如图 10-47 所示。

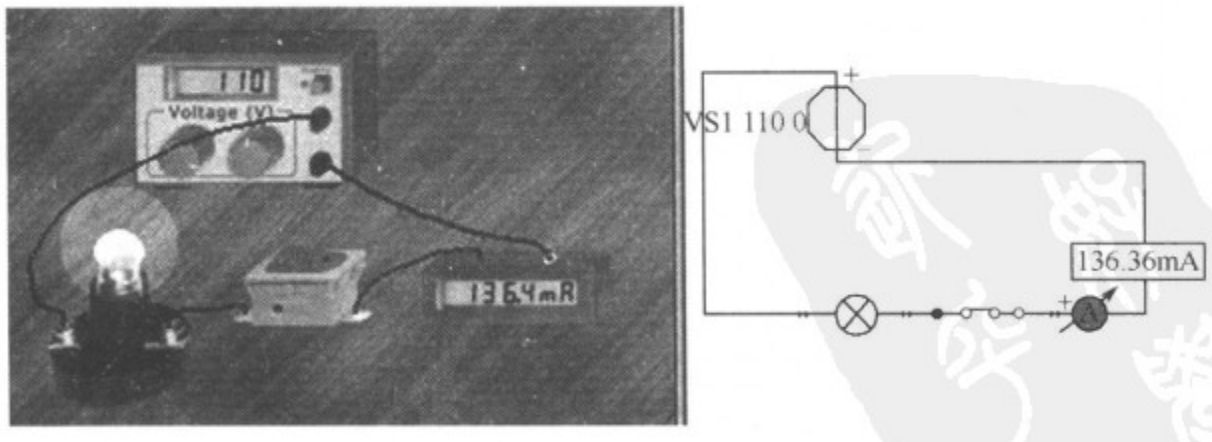


图 10-47　电灯泡实验

打开可调电源的属性对话框，将可调电源的最大电压调整为 120V，当前值调整到 110V，即灯泡电压的上限值，让灯泡达到最亮。这时安培表上显示的回路电流为

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

136.36mA。此时灯泡的功率为：

$$P=UI=110\times0.13636=14.9996\approx15(\mathrm{W})$$

可见，实验结果与理论值一致。

当电源电压等于或低于 110V 而高于 0V 时，灯泡的亮度会随着电压的变化而变化。电压高，亮度高；电压低，亮度低。

当电源电压超过 110V 时，灯泡烧毁，并发出爆炸声，电路呈开路状态。需要通过菜单对灯泡进行修复后，才能继续进行实验。

三、分压实验

将若干个电阻串联在一起，若它们的阻值不相等，则每个电阻上分配到的电压也就不相同。在串联电路中，常常会用分压公式计算电阻电压。设外加电压为 U，电阻 R_1 的电压为 U_1，电阻 R_2 的电压为 U_2，则 U_1 和 U_2 可表示为：

$$U_1=\frac{R_1}{R_1+R_2}U$$

$$U_2=\frac{R_2}{R_1+R_2}U$$

分压实验电路如图 10-48 所示。

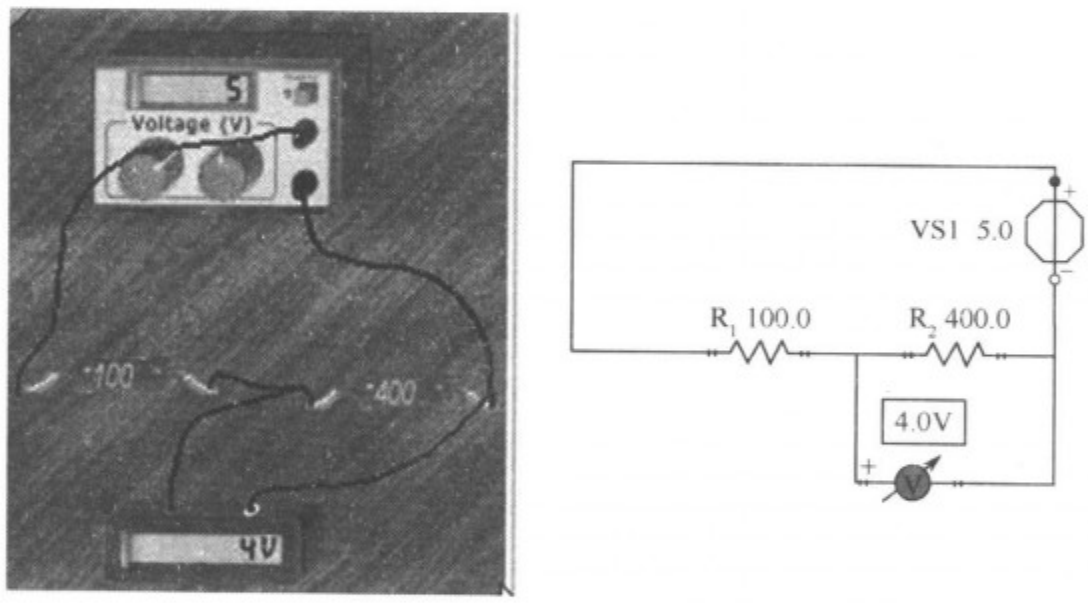


图 10-48　分压电路实验

打开 R_1、R_2 属性对话框，调整 R_1、R_2 的阻值分别为 100Ω 和 400Ω。当电源电压为 5V 时，伏特表测得 400Ω 电阻分配到的电压 U_2 为 4V。

也可用鼠标右击伏特表，出现如图 10-49 所示的快捷菜单。

在出现的快捷菜单中选择“公式”，打开方程编辑器，观察 Edison4.0 的计算过程和结果，如图 10-50 所示。

$$U_1=\frac{R_1}{R_1+R_2}U=\frac{100}{100+400}\times5=1(\mathrm{V})$$

$$U_2=\frac{R_2}{R_1+R_2}U=\frac{400}{100+400}\times5=4(\mathrm{V})$$

实验结果与理论计算值是一致的。

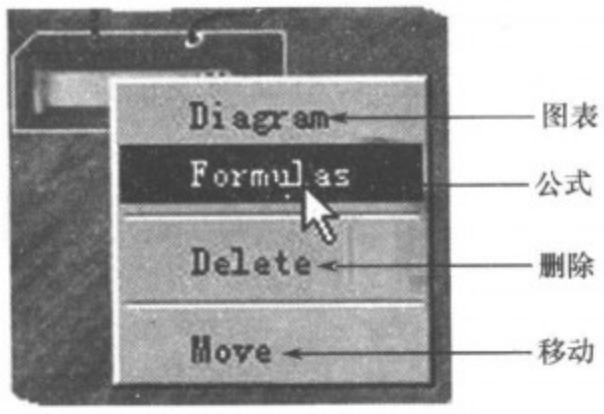


图 10-49　伏特表快捷菜单

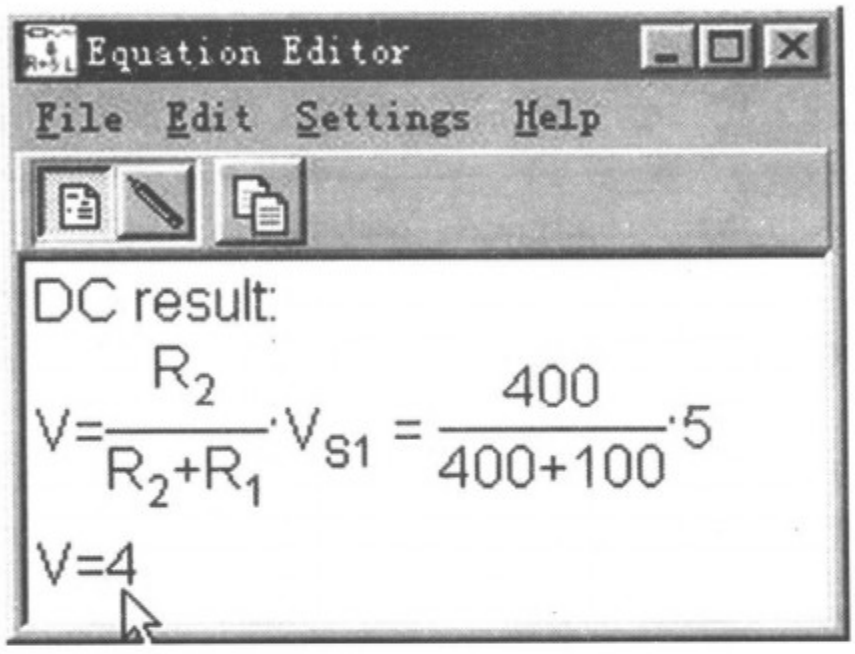


图 10-50　方程编辑器

四、移相和耦合电路实验

下面以 RC 移相和耦合电路为例进行实验，实验电路如图 10-51 所示。

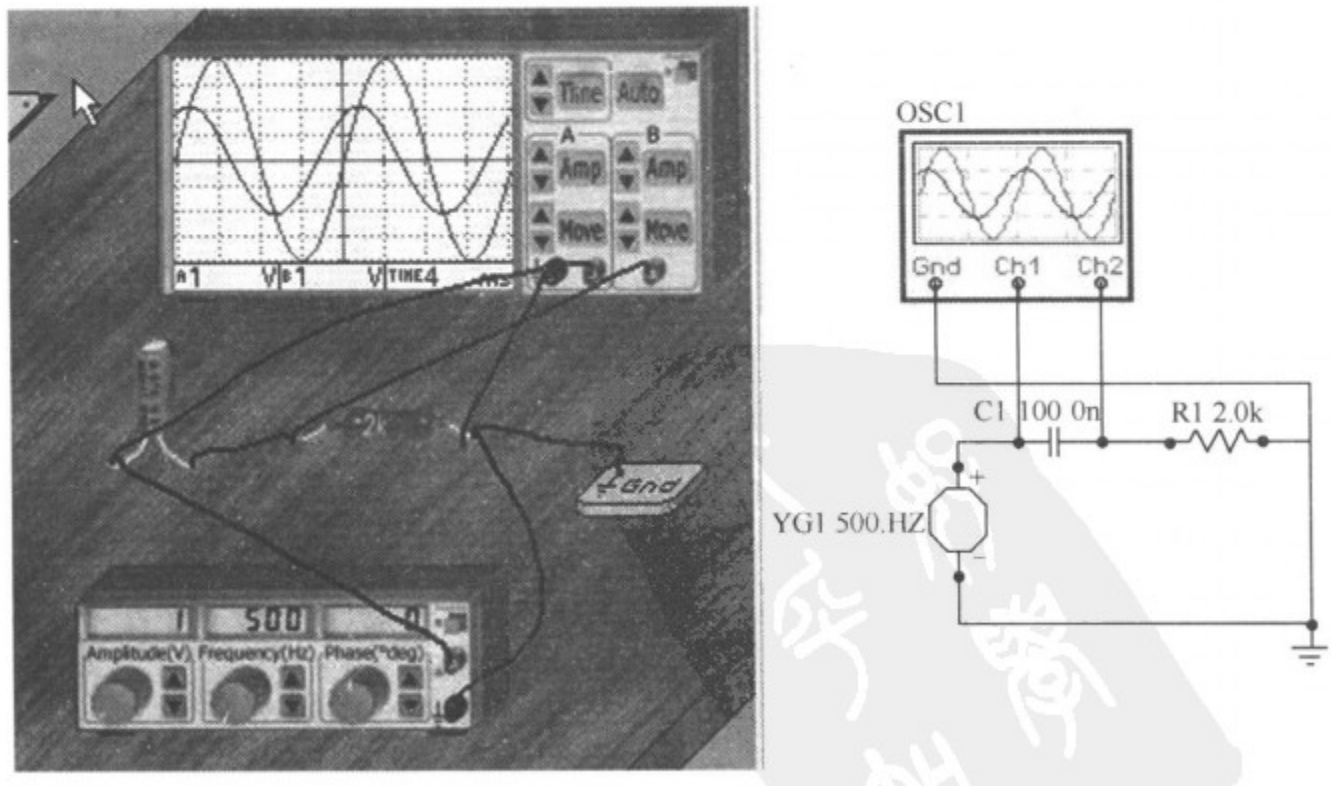


图 10-51　移相和耦合实验电路

打开 R_1、C_1 属性对话框，将 R_1 调整为 2kΩ，C_1 调整为 100nF；打开信号发生器属性

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

对话框，将输入信号调整为500Hz、1V。用示波器测得的波形如图10-51中所示。

在电路分析器中，用右键点击示波器，出现快捷菜单，从快捷菜单中选“Formula”（公式），打开公式编辑器，如图10-52所示。

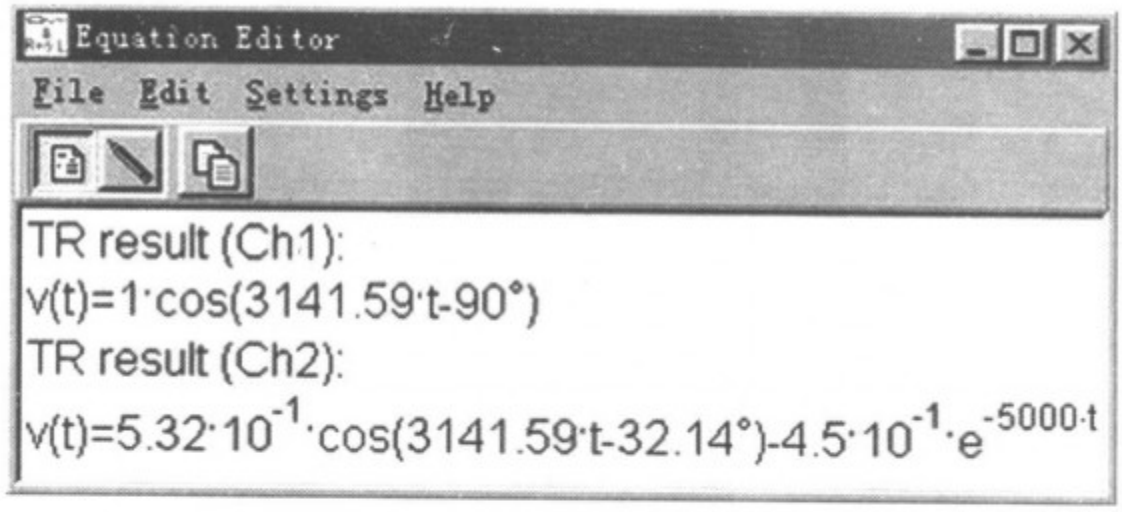


图10-52　公式编辑器

从公式编辑器中可以看出，输入波形与输出波形的相位差为90°－32.14°≈58°，即输出电压波形（与电流波形相位相同）超前输入电压波形58°。这和理论计算结果是一致的（见第六章例9）。

当将电容C改为20μF时，再打开公式编辑器，如图10-53所示。

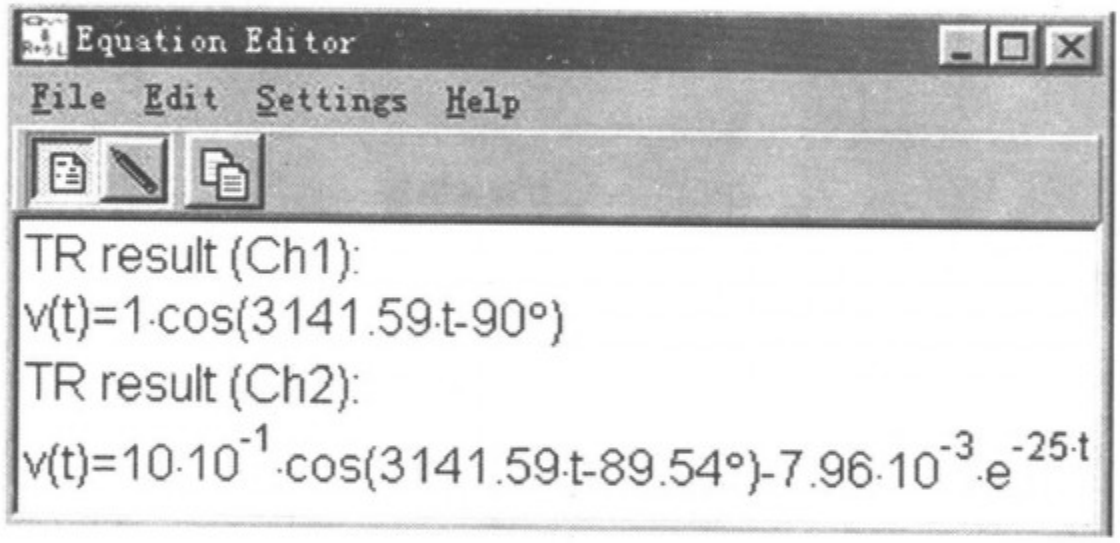


图10-53　电容值改变后的结果

从公式编辑器中可以看出，输入波形与输出波形的相位差为90°－89.54°≈0°，且输入、输出波形幅度均为1V，即输入、输出波形相位和幅度基本相同。这和理论计算结果也是一致的（见第六章例9）。

如果将频率f改为4000Hz，请读者自行实验输出与输入电压的关系，再和理论值对照（见第六章例9），看是否一致。

重点提示：按下控制面板上的单瞬时仿真按钮，将仿真时间调整为0.004s，按下开始/停止按钮进行模拟仿真，此时示波器将显示模拟波形。模拟完成后，用右键点击示波器的空白处，出现快捷菜单，从快捷菜单中选“diagram”（图表），可打开示波器图表分析窗口，如图10-54所示。

图表分析窗口中，工具栏中主要按钮的作用如下：

按钮的作用是选择当前页中的一个图形对象。

按钮的作用是打开图表分析视窗的网格线显示状态。

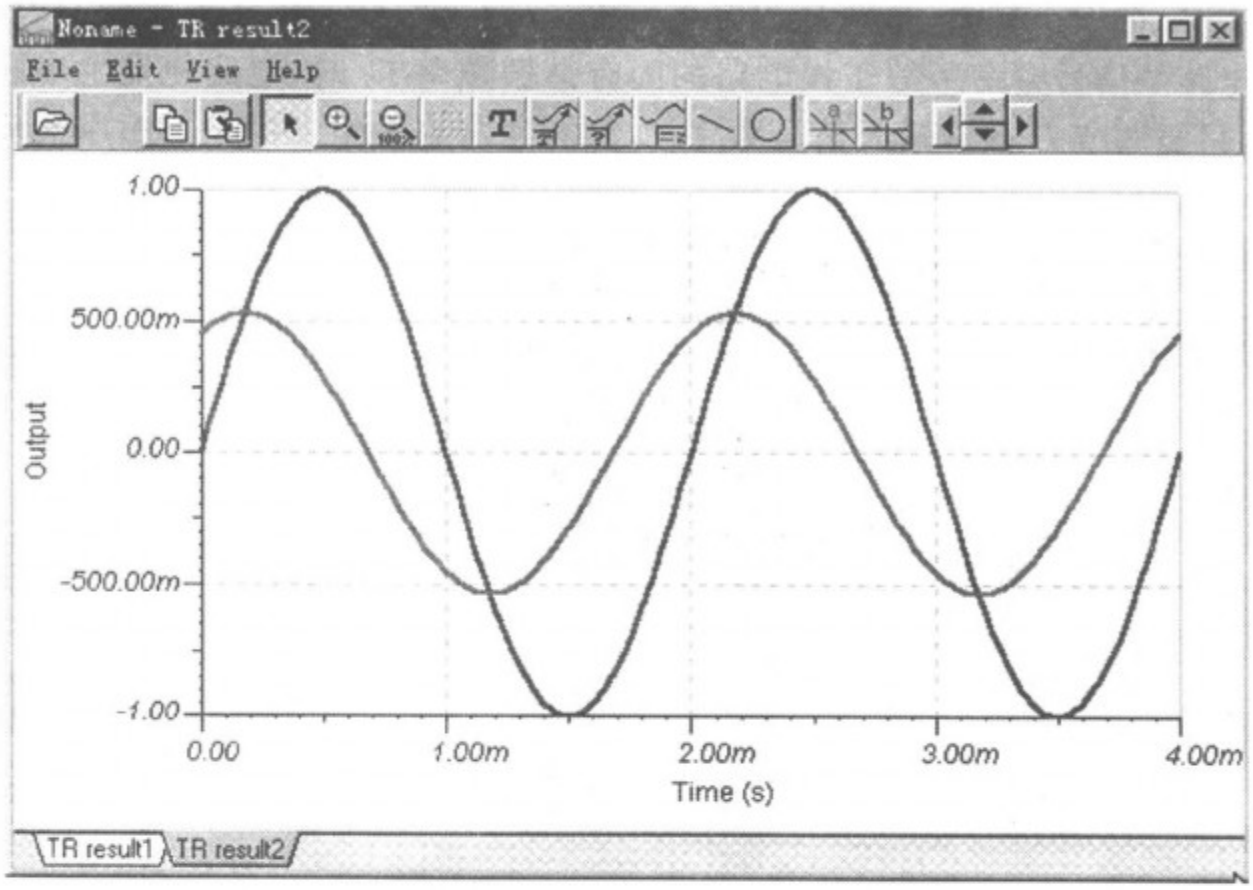


图 10-54　示波器图表分析窗口

按钮 T 的作用是打开文字编辑对话框。

按钮的作用是在选定的文本或公式与曲线之间放置一个箭头。在使用该按钮之前，一定先要在视窗里添加文字，然后按本按钮，用光标指向该文本框，按一下鼠标左键，移动光标，拖出箭头，最后再按一下鼠标左键，即完成画箭头。

按钮的作用是自动放置一带箭头的曲线标签（包括曲线名称）指向选定的曲线。只要按下按钮，用光标指向选定的曲线，再按一下鼠标左键就可完成。另外，通过双击标签，可通过文字编辑框编辑其中的内容。

按钮的作用是自动地创建一个与曲线相关联的包括颜色、标记、曲线名的图例表。只要按下按钮，用光标指向选定的位置，再按一下鼠标左键就可完成。另外，通过双击此表，可通过文字编辑框编辑其中的内容。

按钮的作用是在当前页上放置一条新的折线。

按钮的作用是在当前页上放置一个圆圈。

按钮和的作用是在图表分析视窗里放置游标。按下本按钮，移动光标至所需放置游标的位置，按鼠标左键，就可放置游标。

如果曲线被放大，用这个组合按钮就可以上下左右随意地移动曲线，以便观察分析曲线。

分析图视窗还可以观察几个测试结果，只要按视窗底下的按钮就可以观察到不同的测试结果了。

五、串联谐振电路实验

对于串联谐振动振电路，谐振频率为：

$$f=f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

f_0 只与 L、C 大小有关，而与 R 的大小无关。L、C 大，谐振频率反而低。当送入 LC 串联谐振电路的信号频率 f 等于该电路的固有谐振频率 f_0 时，电路便发生串联谐振现象。可见，只要调节 L、C 或输入信号频率 f，都能使电路发生谐振。下面用实验进行验证，实验电路如图 10-55 所示。

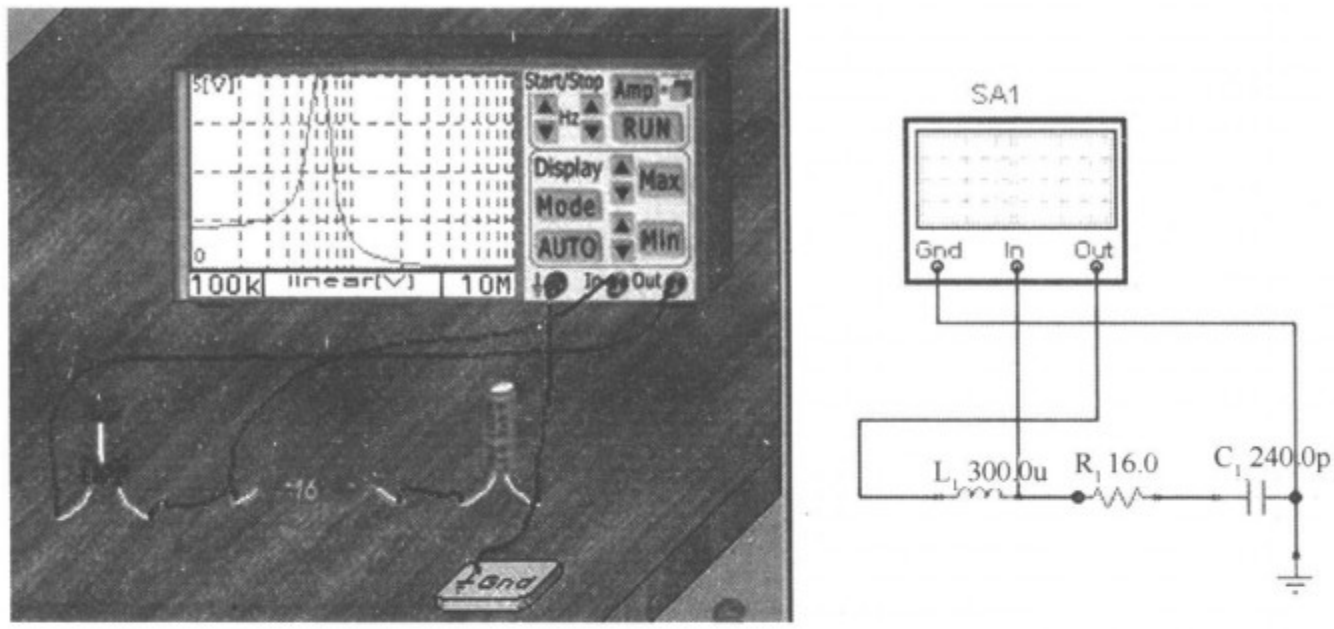


图 10-55　串联谐振电路实验电路

打开 L_1、R_1、C_1 属性对话框，将其分别调整为 $L_1=0.3\text{mH}$，$R_1=16\Omega$，$C_1=204\text{pF}$，打开信号分析器属性对话框，将起始频率设为 100kHz，终止频率设为 10MHz。然后在频率分析器屏幕空白处单击鼠标右键，在出现的快捷菜单中选择“Diagram”（图表），打开图表分析窗口，如图 10-56 所示。

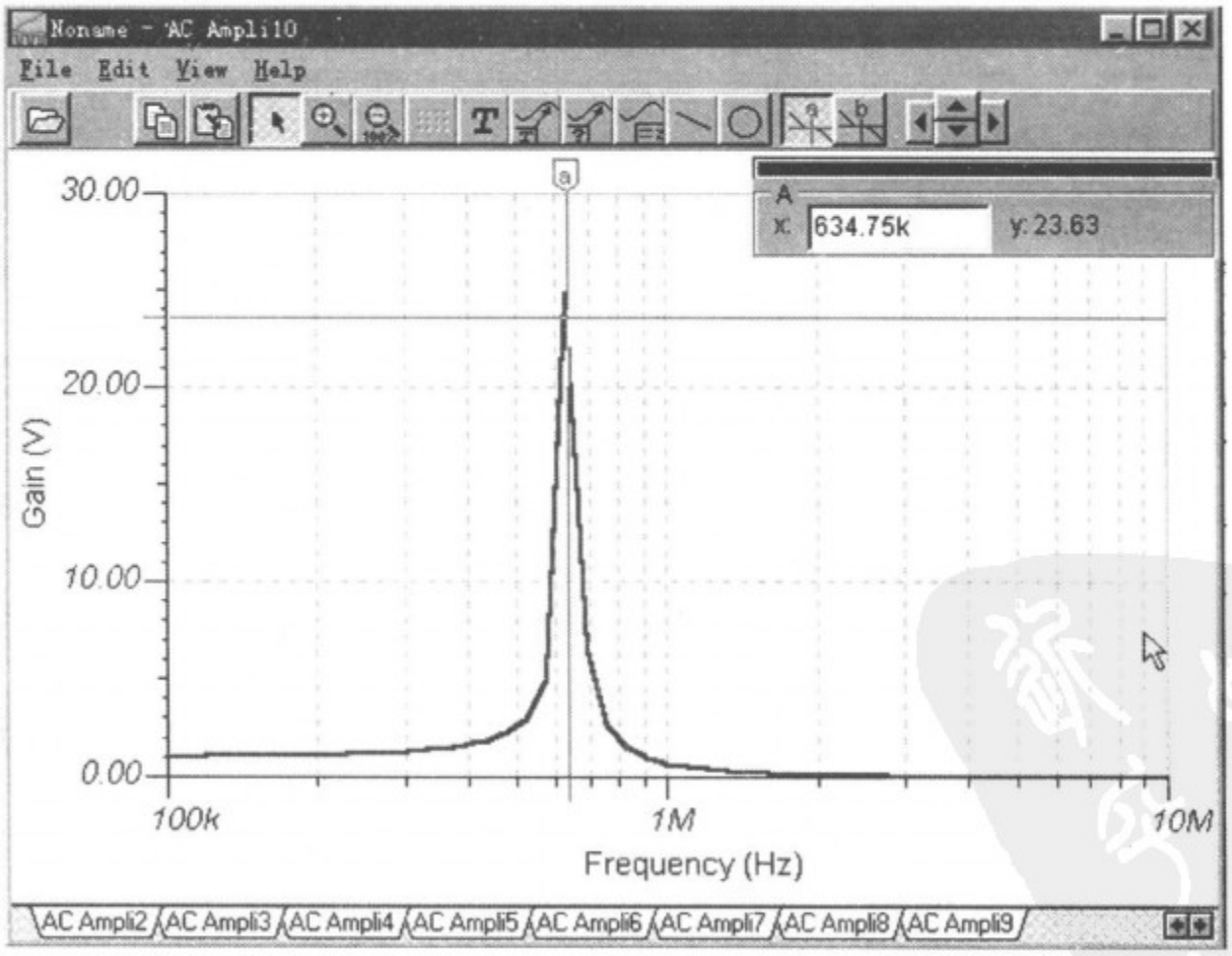


图 10-56　信号分析器图表分析窗口

在图表分析窗口中，按 按钮，然后指向曲线的最高点，单击鼠标左键，放置一个游

标，图表分析窗口中显示为 634.75kHz，这就是串联谐振频率。

下面用公式验证一下：

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}=\frac{1}{2\times3.14\times\sqrt{0.3\times10^{-3}\times204\times10^{-12}}}\approx640(\text{kHz})$$

可见，实验结果与理论计算值基本一致。

六、电路的过渡状态实验

电路的过渡状态实验如图 10-57 所示。

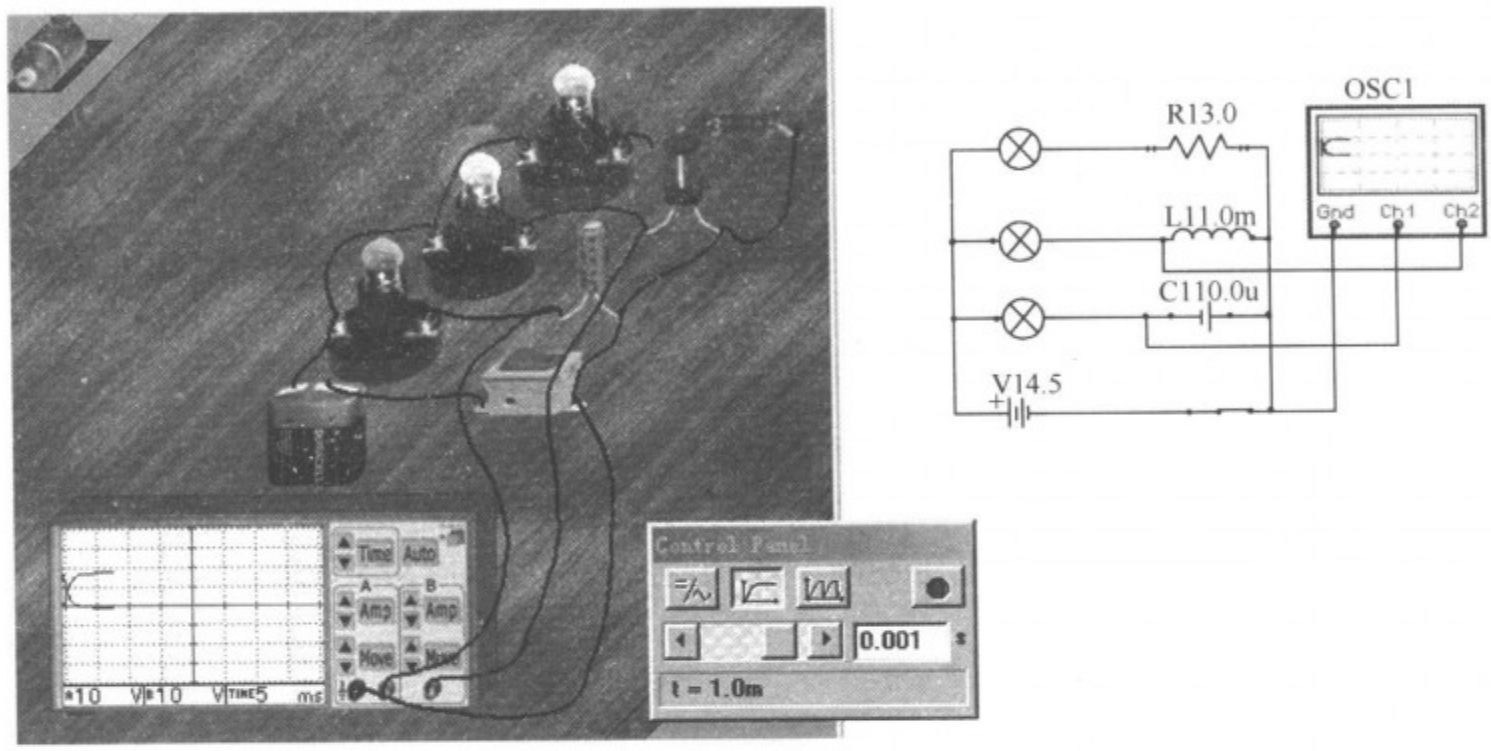


图 10-57　电路的过渡状态实验

实验时，打开 R_1、L_1、C_1 的属性对话框，调整其大小分别为 3Ω、1mH 和 10μF。从实验中可以明显地看到：当开关（设为 S）闭合时，与电阻串联的灯泡（设为 D_R）会立即亮；与电感串联的灯泡（设为 D_L）逐渐变亮；而与电容串联的灯泡（设为 D_C）由亮逐渐变为不亮。这说明电阻元件接通电源后其电流从零到达新的稳态值是立即完成的，电阻的电压与电流产生了跃变，所以电阻支路没有过渡过程。电感支路在开关闭合的瞬间，由于电流的变化率最大，电感电压等于电源电压，使灯泡的电压为零，电路中没有电流，因此 D_L 不亮；开关 S 闭合后，电感电流逐渐增大，灯泡逐渐变亮，而电流变化率减小，到达新的稳态值时，电感对于直流相当于短路，此时电感电压为零，灯泡电压等于电源电压，因此 D_L 达到最亮，所以电感电流由零到达稳态值要有一个过渡过程。电容支路在开关闭合瞬间，电容没有储存电荷，电容电压为零，这时灯泡的电压等于电源电压，所以 D_C 最亮；开关闭合后，随着电容充电电压的升高，Uc 的电压逐渐减小，灯泡随之变暗，当电容电压等于电源电压时，电路到达新的稳定状态，电容对直流相当于开路，没有电流通过灯泡，因此 D_C 不亮，所以电容电压由零到达稳态值也要有一个过渡过程。

按下控制面板上的单瞬时仿真按钮，将仿真时间调整为 0.001s，按下开始/停止按钮进行模拟仿真，此时示波器将显示模拟波形。模拟完成后，用右键点击示波器的空白处，出现快捷菜单，从快捷菜单中选“diagram”（图表），可打开示波器图表分析窗口，如图 10-58 所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

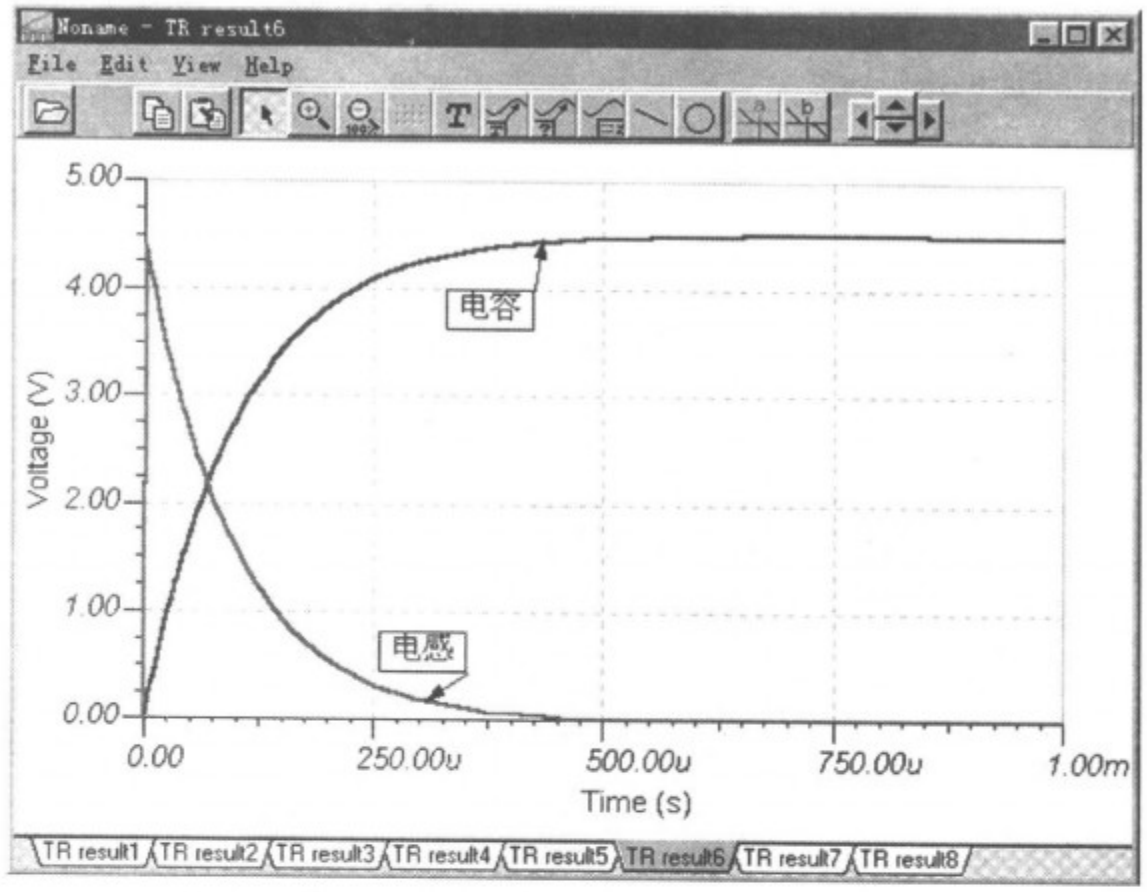


图 10-58　电感和电容两端的波形变化情况

从波形图上可以清楚地看出，在开关刚闭合的这段时间(0.001s)内，电感和电容两端的电压变化情况，即电感两端的电压逐渐下降，电容两端的电压逐渐上升。

七、RC 电路充放电实验

下面以图 10-59 所示电路进行 RC 电路充放电实验。这个电路和本书第 9 章例 7 所示电路完全一致。

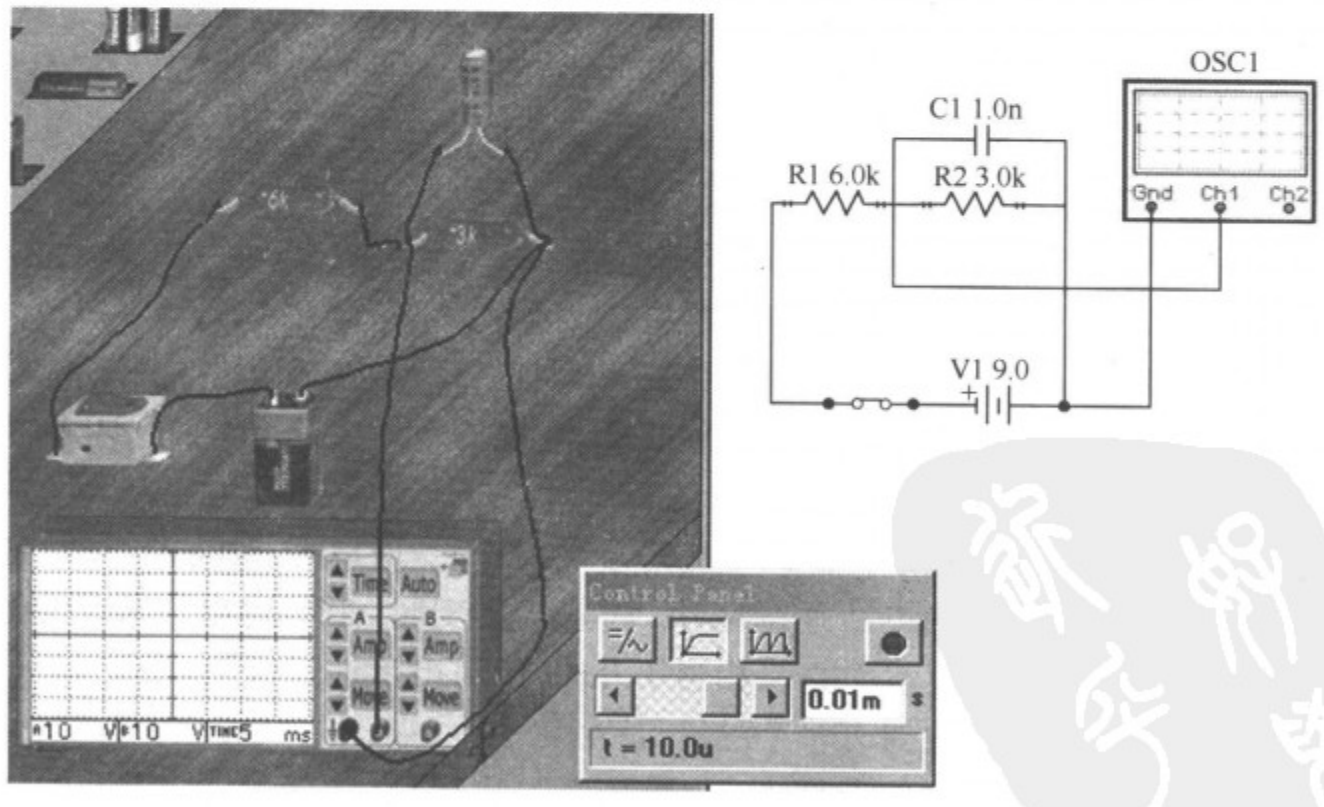


图 10-59　RC 电路充放电实验

实验时，打开 R_1、R_2、C_1 的属性对话框，调整其大小分别为 6kΩ、3kΩ 和 1nF (1000pF)。合上实验电路上的开关，然后，按下控制面板上的单瞬时仿真按钮，将仿真

时间调整为 0.01ms(10μs),按下开始/停止按钮进行模拟仿真,此时示波器将显示模拟波形。模拟完成后,用右键点击示波器的空白处,出现快捷菜单,从快捷菜单中选"diagram"(图表),可打开示波器图表分析窗口,如图 10-60 所示。

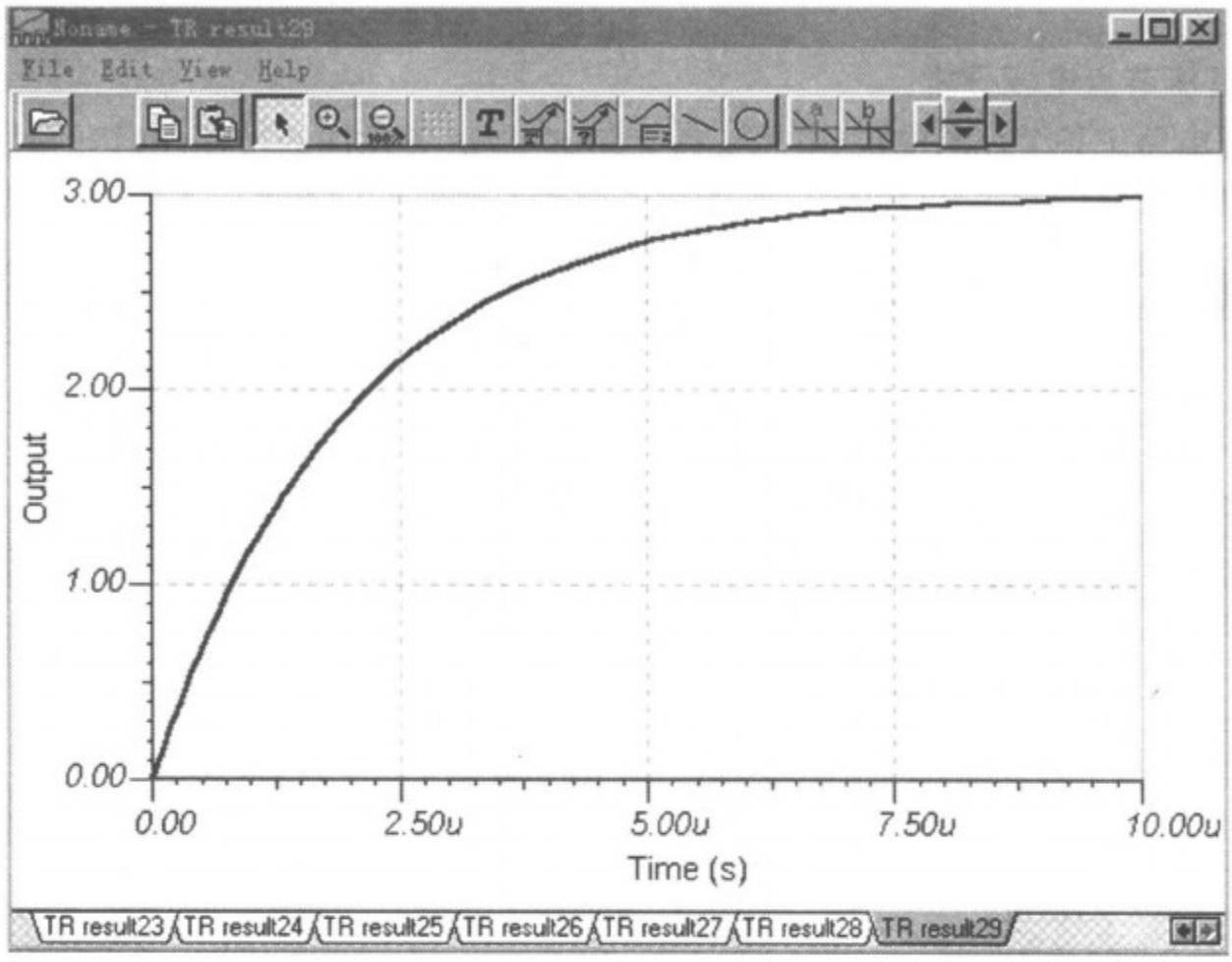


图 10-60　电容两端的波形变化情况

(图中横坐标 u 应为 μ)

再从示波器的快捷菜单中选择"Formula"(公式),可打开公式编辑器,如图 10-61 所示。

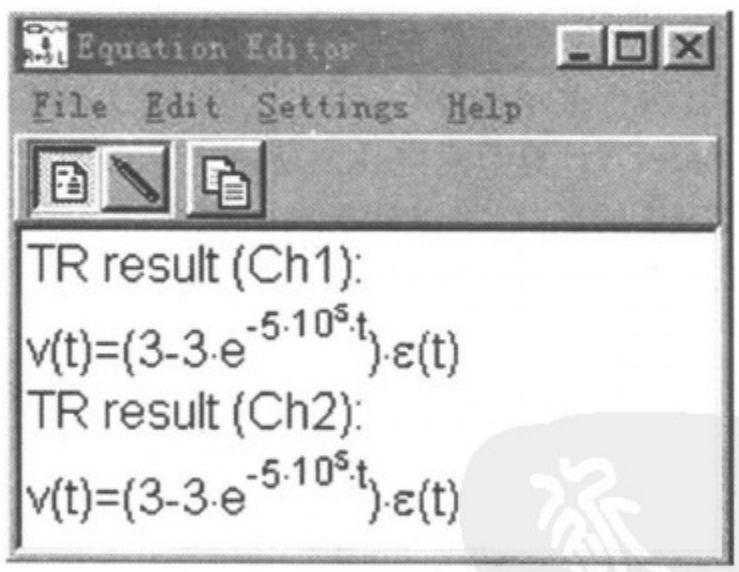


图 10-61　公式编辑器

将实验中公式编辑器的内容与第九章例 7 理论计算对照一下,可以发现,实验与理论计算完全一致。

实验时,先将开关合上,给电容充电,再将开关断开,然后按下控制面板上的单瞬时仿真按钮进行仿真,演示 RC 电路的放电特性,请读者自行实验并分析电容器放电时两端波形的变化情况。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

八、用 Edison4.0 电路编辑器进行电路基础实验

下面结合实例，说明 Edison4.0 电路图编辑器的仿真方法。这些方法同样适合于 TINA 软件。

1. 直流节点电压分析

计算电路中各节点的电位(电压)、各支路的电流、各元件的功耗、电路的阻抗等。如果在电路中还有信号源(电压发生器、电流发生器)，则它们的直流电平参数也被计入。

在图 10-62 所示的电路中，放入一个直流电压源 VS1，电压为 5V；三个电阻 R_1、R_2、R_3；两个电压指针 VP1 和 VP2；以及 3 个电流箭头 AM1、AM2、AM3。

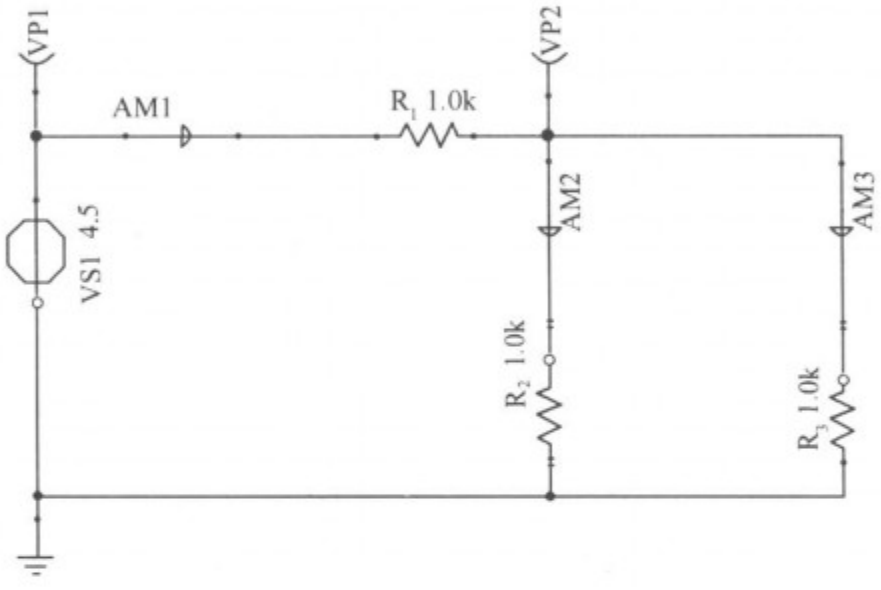


图 10-62　直流节点电压分析电路

画好该电路图后，先调用菜单命令“Analysis”(分析)→“ERC”，检查电路是否有错。然后在主工具栏中按下 DC 交互式模式开关，在电压指针和电流箭头处即显示电压和电流值及单位。

关闭 DC 交互式模式，执行菜单命令“Analysis”(分析)→“DC Analysis”(直流分析)→“Calculate Nodal Voltages”(计算节点电压)，除在电压指针和电流箭头处显示电压和电流值外，鼠标还将变成表笔的形状，将鼠标指向某个节点，即可在出现的信息框中显示该节点的电压值，如图 10-63 所示。

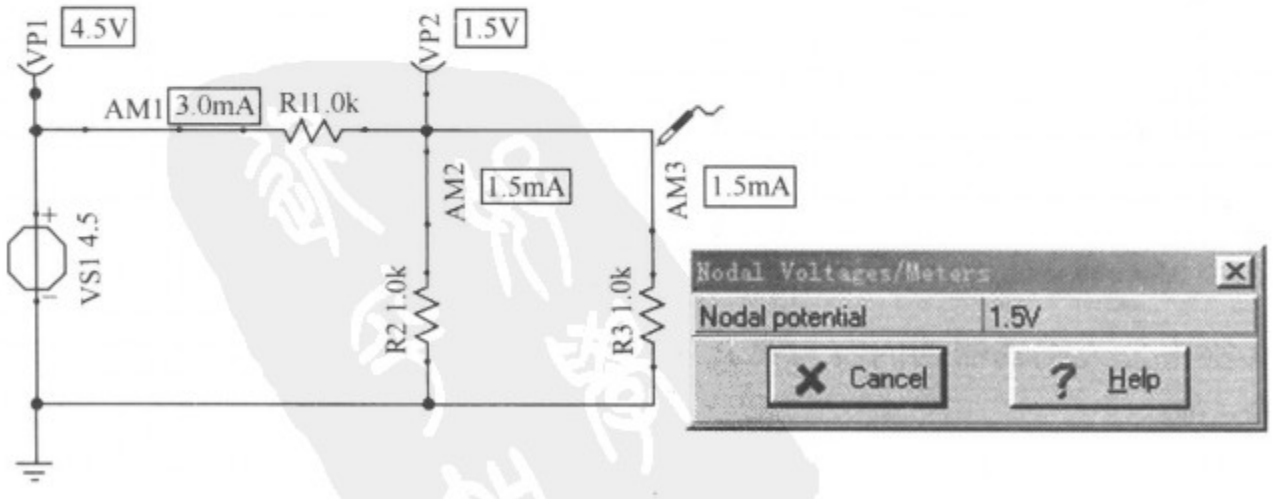


图 10-63　直流节点电压分析情况

需要注意的是，不同的参数分析要选用对应的交互式模式开关选项。如交流分析用AC、数字分析用 Digital(数字)、瞬态分析用 Transient(瞬时)或 Transient Single Shot(瞬时单触发)。

2. 交流节点电压分析

如果电源为交流电，应采用交流节点电压计算。Edison4.0 的电路图编辑器算出电路中各种交流量数据，如电压、相位、有功功率和无功功率等。图 10-64 中，电压发生器电压设为 10V/1kHz。按下 AC 交互式模式开关，仪表将显示各电量的数值和相位。

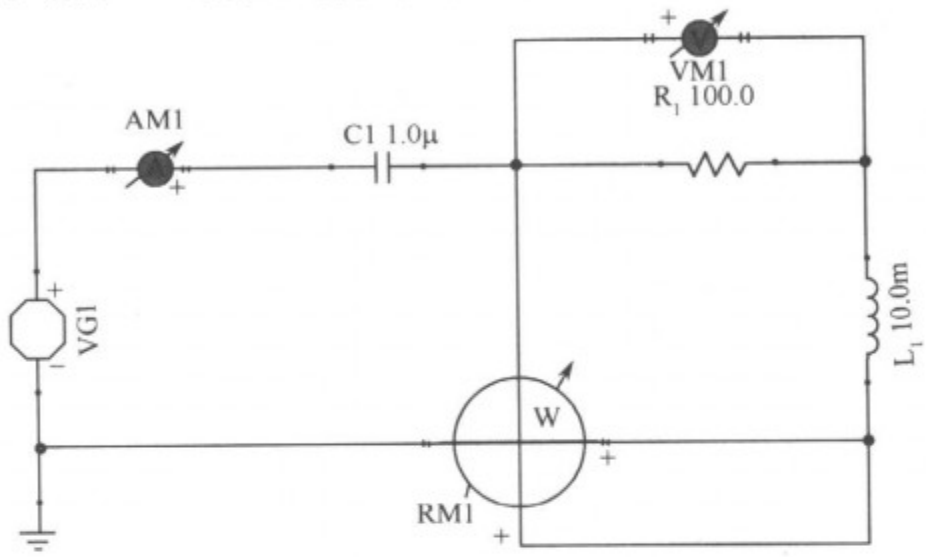


图 10-64　交流节点电压分析电路

另外，各电量的数值和相位也可通过执行菜单命令“Analysis”(分析)→“AC Analysis”(交流分析)→“Calculate Nodal Voltages”(计算节点电压)进行显示。

3. 直流传输分析

直流传输分析用于计算和显示直流传输特性。程序按定义的采样数计算电路直流传输特性，默认值是 20。如要获得较精细的曲线，则应增大采样数。程序平均地划分从起始值到终止值之间的数值。对于每一个输入点，程序计算输出值。通常输入值是按递增的顺序产生的。如果用户喜欢按递减的顺序计算，可将输入范围的上限赋值到输入的起始值，下限赋值到输入的终止值。

例如，在图 10-65 所示的电路中，将电源的内部阻抗调为 2Ω。实验证当负载电阻 R_1 与电源内阻相等时，负载 R_1 获得最大功率。

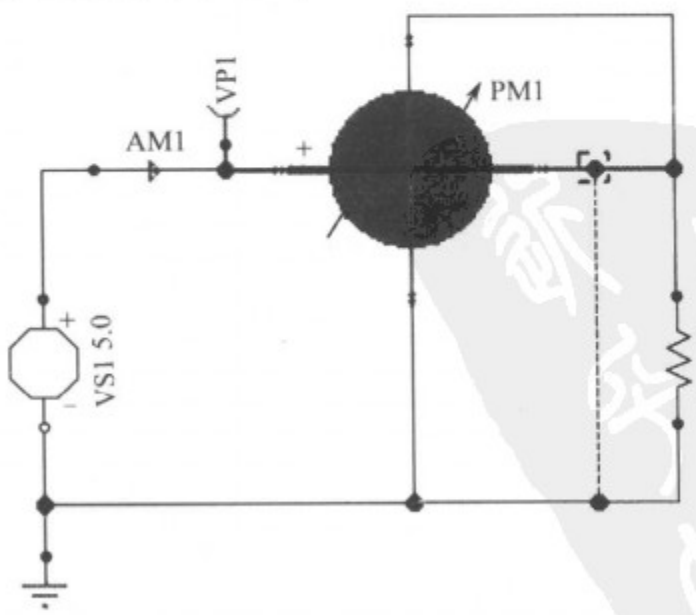


图 10-65　直流传输分析电路

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

必须步进改变负载 R_1 的阻值才能得到直流传输曲线。所以要把电阻 R_1 定义为输入端。点击主工具栏上的输入端按钮，将输入端符号加到电阻 R_1 上。执行菜单命令“Analysis”(分析)→“DC Analysis”(直流分析)→“DC Transfer characteristic”(直流传输特性)，随后弹出 DC 传输特性对话框，将起始值设为 0.0，终止值设为 6.0，采样数设为 100，如图 10-66 所示。

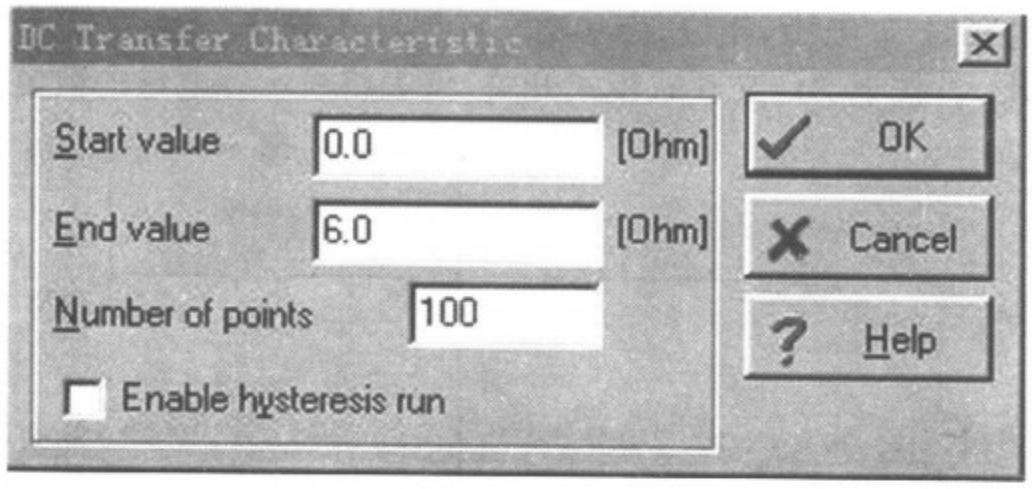


图 10-66　DC 传输特性对话框

确定后，得到同时显示的电流、电压和功率的三条曲线，如图 10-67 所示。

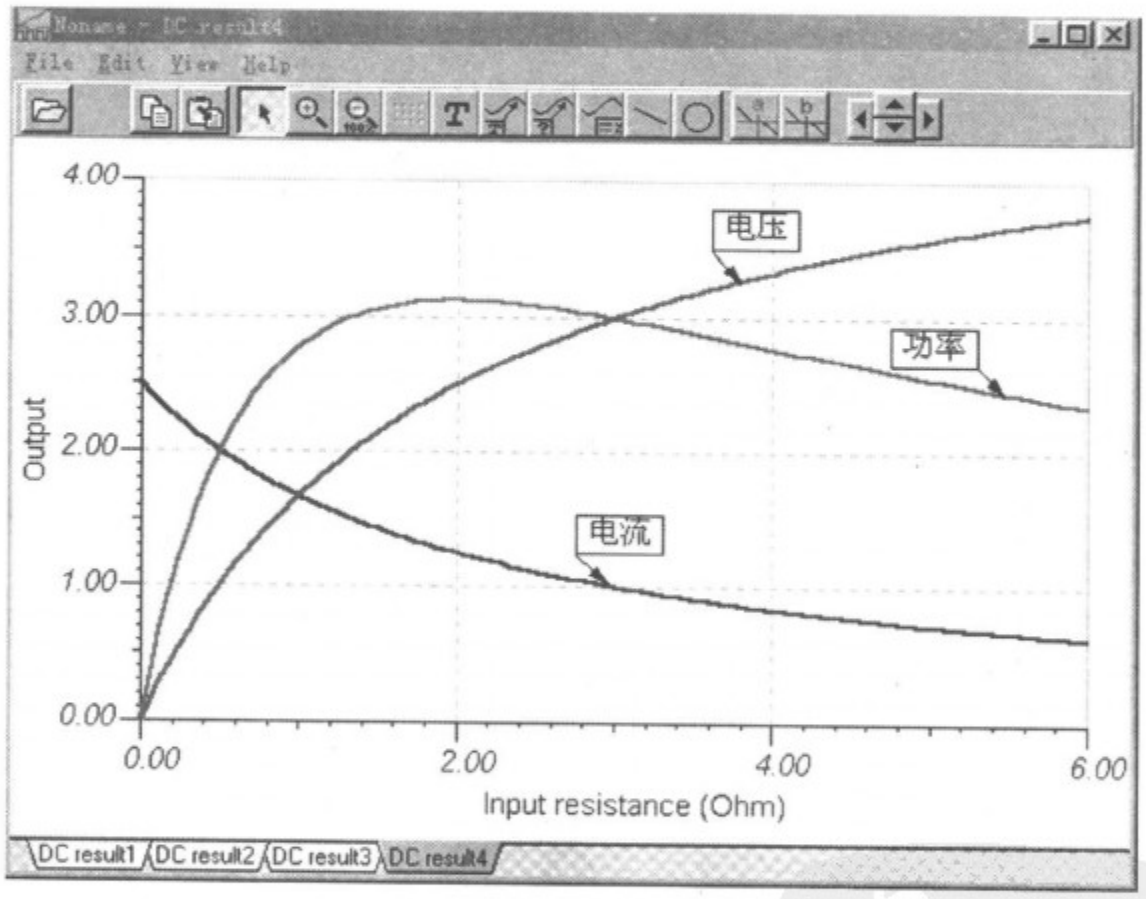


图 10-67　功率、电压和电流曲线

4. 瞬时和瞬时单触发分析

对于积分电路和微分电路，需要用瞬时或瞬时单触发进行分析，下面分别进行介绍。

(1)积分电路

积分电路的输出信号为输入信号的积分，它是一种应用比较广泛的运算电路，不仅可用于延时、定时电路，而且还用于锯齿波产生电路以及构成数/模转换器等。

为了实验积分电路，需要输入方波信号，而方波信号在电路图编辑器中，因此，需要启动电路图编辑器。

启动电路图编辑器，编辑好积分电路，点击工具栏中的按钮，在 C_1 两端放置输出端，如图 10-68 所示。

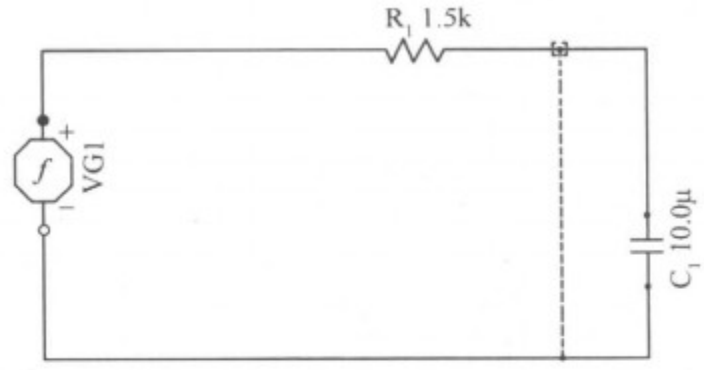


图 10-68　积分电路实验

双击电压信号源，打开其属性对话框，如图 10-69 所示。

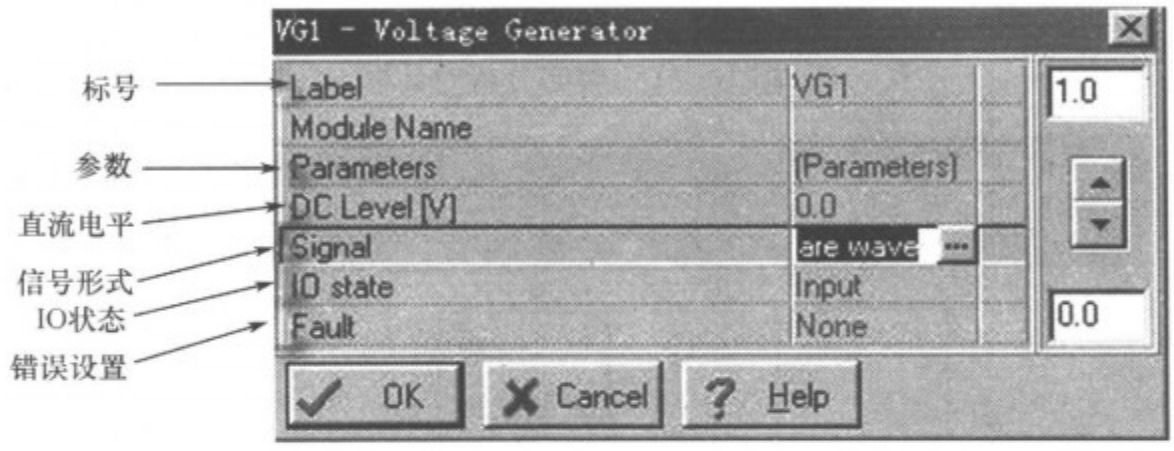


图 10-69　电压信号源属性对话框

单击图中的按钮，出现如图 10-70 所示的对话框。

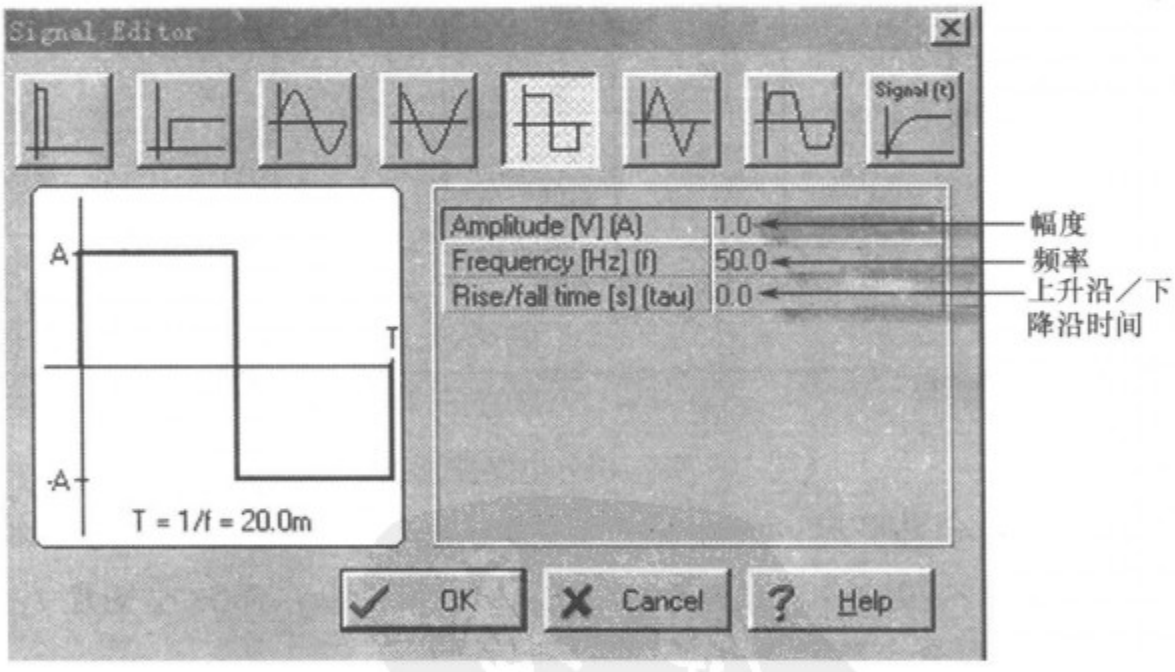


图 10-70　信号源类型编辑对话框

在出现的对话框中选择方波信号，信号的幅度、频率和上升沿/下降沿时间采用默认形式(1V，50Hz，0)，如图 10-70 中所示。

点击电路图分析器菜单栏(见图 10-33)上的“Analysis”(分析)→“Transient”(暂态)，在出现的对话框中，将起始时间设为 0s，将终止时间设为 50ms，如图 10-71 所示。

点击对话框中的 OK 按钮，屏幕即出现如图 10-72 所示的积分电路波形图。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

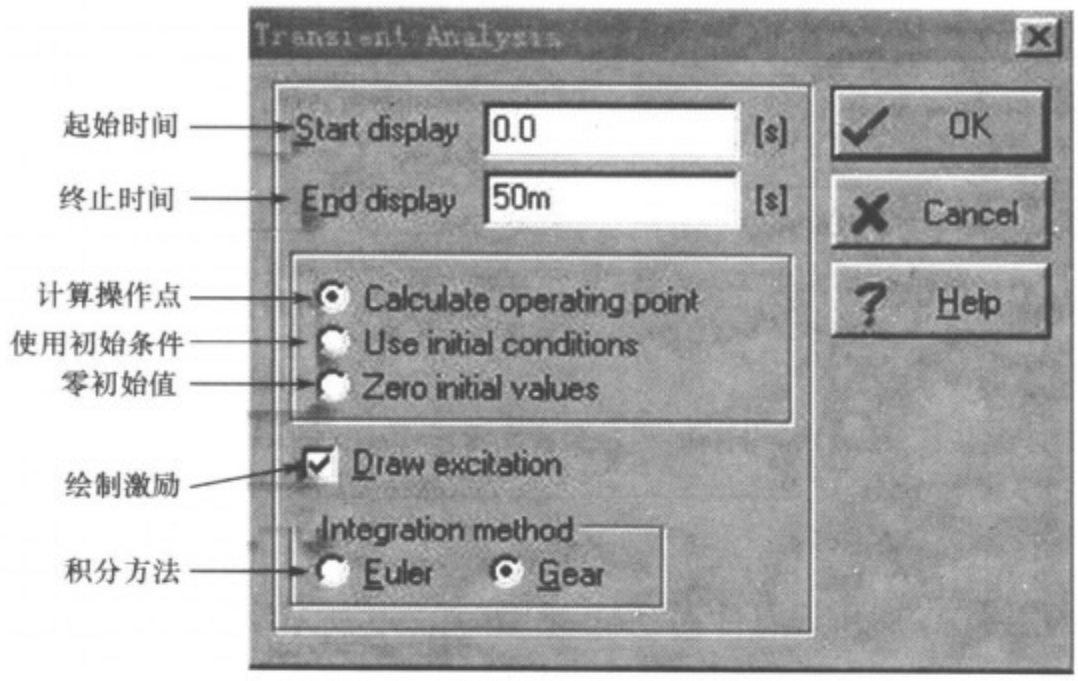


图 10-71　暂态分析对话框

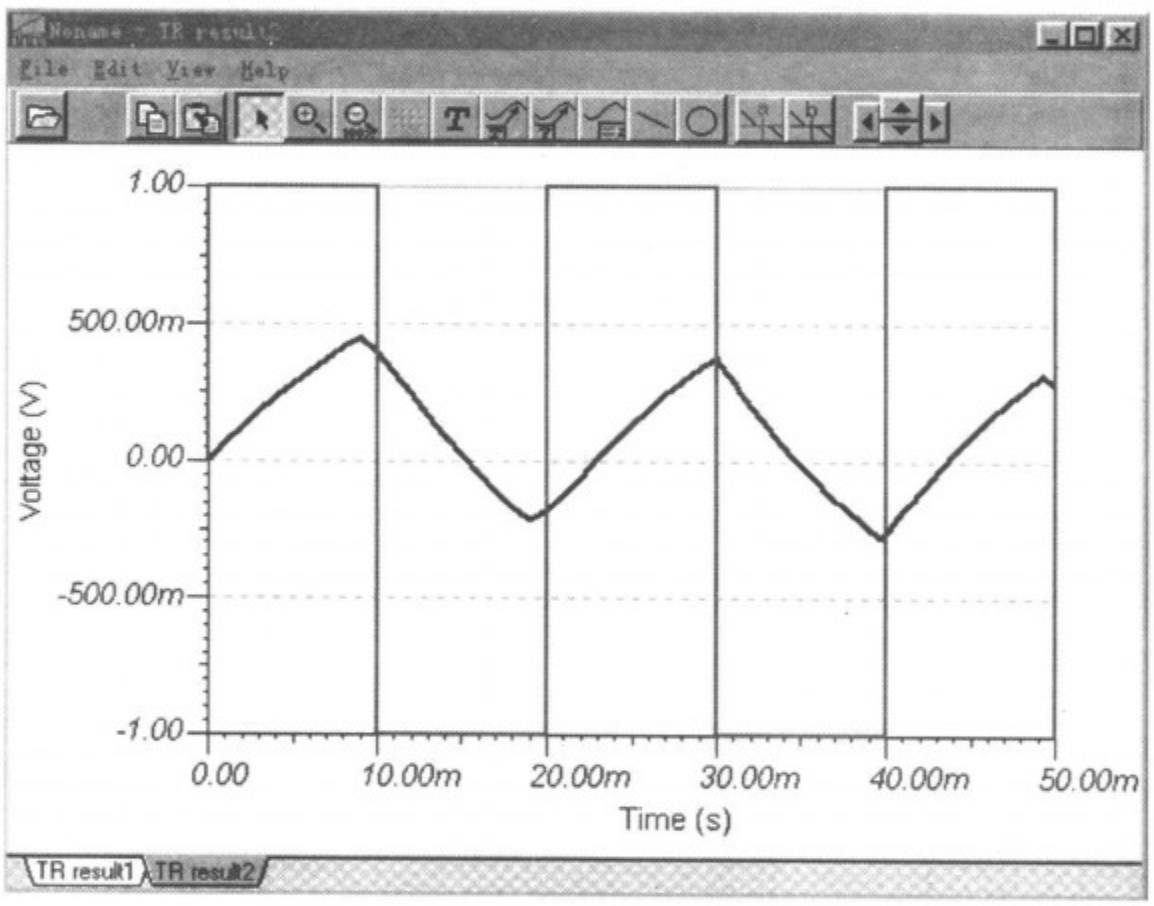


图 10-72　积分电路波形图

重点提示：构成积分电路时，电路的时间常数 τ 大于脉冲宽度 t_p。对于本例，电路的时间常数 $\tau=RC=1.5\times10^3\times10\times10^{-6}=0.015(s)=15(ms)$，而脉冲宽度 $t_p=0.02/2=0.01(s)=10ms$，符合积分电路的条件。

(2)微分电路

微分电路的输出信号是输入信号的微分，主要用于产生尖脉冲信号。启动电路图编辑器，编辑好微分电路，点击工具栏中的 按钮，在 R_1 两端放置输出端，如图 10-73 所示。

方波信号的幅度、频率和上升沿时间采用默认形式(1V，50Hz，0)。

点击 Analysis(分析)菜单下的 Transient(暂态)，在出现的对话框中，将起始时间设

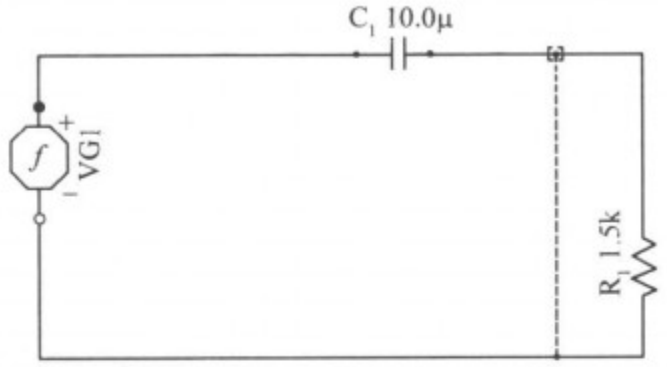


图 10-73　微分电路实验

为 0s、终止时间设为 50ms，点击对话框中的 OK 按钮，屏幕即出现如图 10-74 所示的微分电路波形图。

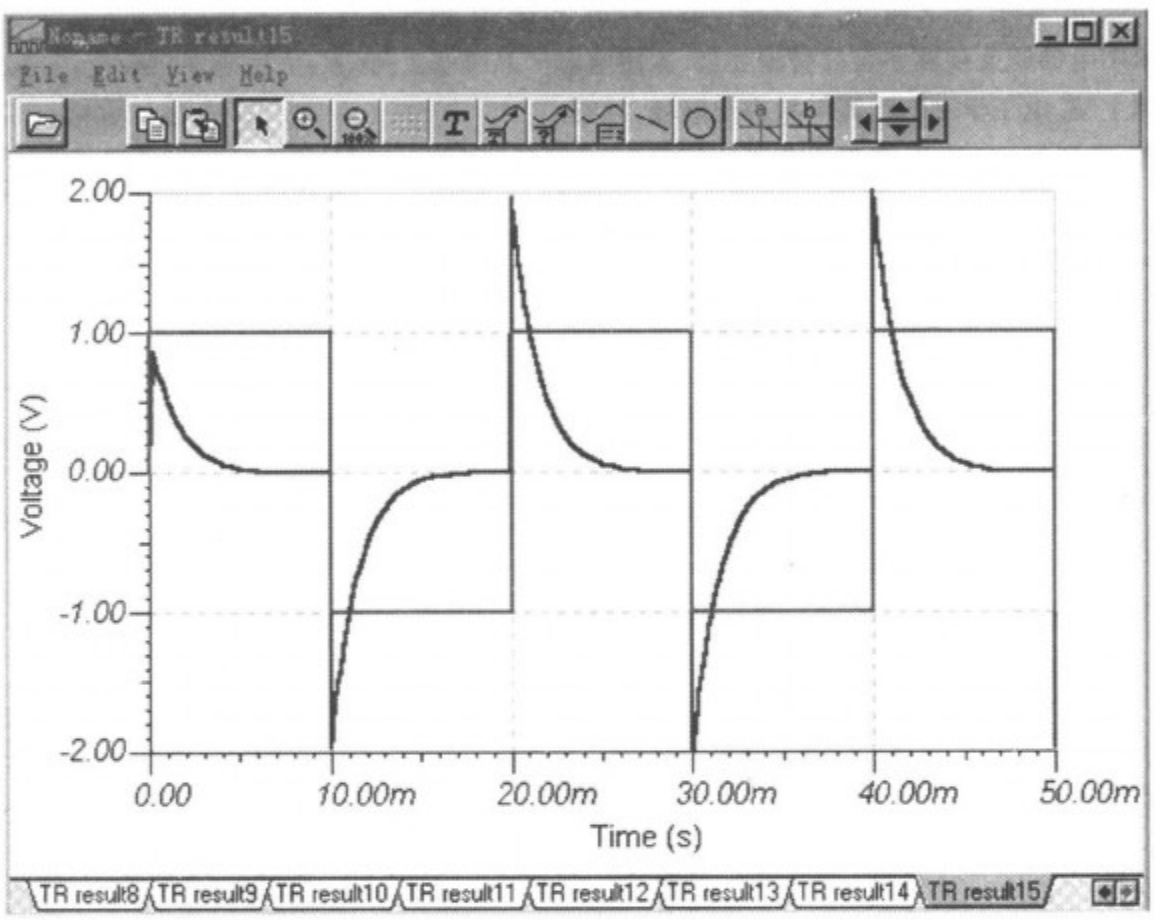


图 10-74　微分电路波形图

重点提示：构成微分电路时，电路的时间常数 τ 小于脉冲宽度 t_p。对于本例，电路的时间常数 $\tau=RC=1.5\times10^3\times1\times10^{-6}=1.5(\text{ms})$，而脉冲宽度 $t_p=0.02/2=0.01(\text{s})=10\text{ms}$，符合微分电路的条件。

在“Analysis”菜单中，还有 AC 传输特性分析、数字分析、数字计时分析等内容，将在本书的系列丛书《从零开始学模拟电子技术》和《从零开始学数字电子技术》中进行介绍。

从以上可以看出，用 Edison4.0 进行仿真模拟实验，实验过程非常接近实际操作的效果。即能够模仿实物电路的连接，而且各元器件选择范围广，参数修改方便，不会像实际操作那样多次地使用元件而损坏器材，使电路调试变得快捷方便。

总之，Edison4.0 是实物图和电路图相结合的多媒体实验室，电子爱好者通过实验，将使电路基础的学习变得生动有趣，加深对电路理论知识的认识，一步一步走向电子制作和电路设计的殿堂。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

参 考 文 献

[1] 张宪主编. 电工技术. 北京：国防工业出版社，2003.

[2] 涂用军，李力，黄军辉，周金玲. 电路基础. 广州：华南理工大学出版社，2001.

[3] 王惟言，莫志衡. Edison 立体声光实验室. 北京：人民邮电出版社，2002.

[4] 高士曾. 实用无线电维修理论基础. 北京：机械工业出版社，1999.

[5] 胡斌主编，孙安龙 副主编. 电子线路与电子技术. 济南：山东科学技术出版社，1999.

[6] 全国家用电器职业技能鉴定教材编委会. 家用电器产品维修工. 北京：人民邮电出版社，2002.

[7] 秦曾煌主编. 电工学. 北京：高等教育出版社，1985.

[8] 任德齐，李怀甫，蒲启彬. 电子产品维修技术基础. 重庆：重庆大学出版社，2000.